• МАТЕРИАЛЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ •

Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ, В. В. ПАСЫНКОВ

МАТЕРИАЛЫ *в радиоэлектронике*

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

Н. П. БОГОРОДИЦКИЙ, В. В. ПАСЫНКОВ

МАТЕРИАЛЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР в качестве учебника для радиотехнических высших учебных заведений и факультетов

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

ЭЭ-5-2
6П2.1.06
Б.74

В книге излагаются основы физики явлений, происходящих в радиотехнических электроизоляционных, полупроводниковых, проводниковых и магнитных материалах, и описываются их электрические свойства, особенно при повышенных и высоких частотах, а также даются их физико-химические и механические характеристики. Кратко рассматривается технология производства многих радиотехнических материалов и изготовление из них изделий и деталей, применяемых в радиоэлектронике.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов радиотехнических вузов и факультетов — радиотехнических, электрофизических и электронной техники других вузов. Она может быть полезна инженерам, работающим в области радиоэлектроники.

Богородицкий Николай Петрович и Пасынков Владимир Васильевич

МАТЕРИАЛЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

М.-Л., Госэнергоиздат, 1961, 352 стр., с рис. 6П2.1.06

Редактор *Я. И. Панова.* Техн. редактор *Е. М. Соболева*

Сдано в производство 29/V 1960 г. Подписано к печати 21/I 1961 г. М-03003. Печ. л. 22. Уч.-изд. л. 24,4. Бум. л. 11. Формат 60 × 92¹/₁₆. Тираж 45 000 экз. Цена 95 коп. Заказ № 930.

Ленинградский Совет народного хозяйства. Управление полиграфической промышленности. Типография № 1 «Печатный Двор» имени А. М. Горького. Ленинград, Гатчинская, 26.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Широкое развитие радиоэлектроники и техники высоких частот вызвало необходимость в использовании новых электротехнических материалов. Оценка качества этих материалов производится также с новых позиций, учитывающих прежде всего специфические высокочастотные свойства вещества. В ряде случаев глубокое понимание структурных особенностей и свойств твердого тела позволяет оригинально решать те или иные конструктивные задачи, сокращать габариты и вес приборов и повышать их эксплуатационную надежность. Поэтому в учебные планы подготовки инженеров-радистов и инженеров по электронной технике введена дисциплина „Электрорадиоматериалы", отличающаяся своей целеустремленностью от обычного курса „Электротехнические материалы", читаемого для студентов других электротехнических специальностей.

Настоящая книга, являющаяся одной из первых попыток создания учебника по курсу „Электрорадиоматериалы", написана авторами к 100-летию со дня рождения изобретателя радио А. С. Попова. Она содержит основные сведения о применяемых в радиоэлектронике изоляционных, полупроводниковых, проводниковых и магнитных материалах.

Изучение численных характеристик материалов следует вести, пользуясь определенной системой единиц. В курсах теоретических основ электротехники и радиотехники, а также в специальных дисциплинах и во многих новых учебниках и монографиях применяется рационализированная форма уравнений электромагнитного поля и система единиц МКSA. Эта система введена в практику по указанию Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР в 1950 г. и принята в ГОСТ 8033-56. С другой стороны, физическая литература, столь необходимая для расширения и углубления знаний студентов по курсу „Электрорадиоматериалы", широко использует и другие системы единиц.

В государственных стандартах, ведомственных нормалях и заводских технических условиях на электротехнические материалы укоренились единицы, наиболее удобные для практики и в ряде случаев не относящиеся ни к одной из систем единиц. Поэтому, принимая во внимание современный переходный период и сложившиеся привычные представления о свойствах материалов в практических единицах, в настоящем учебнике численные значения характеристик материалов

даны с учетом наибольшего удобства их применения на практике, на производстве.

При пользовании уравнениями электромагнитного поля, приведенными в учебнике в рационализированной форме, и другими формулами авторы стремились везде подчеркнуть значения переводных коэффициентов, позволяющих подставлять численные параметры веществ в тех единицах, в которых они даны в таблицах и на рисунках. С такими операциями специалистам все время приходится иметь дело на производстве и институт должен их к этому хорошо подготовить.

Рукопись учебника рецензировалась заведующим кафедрой физики Ленинградского политехнического института имени М. И. Калинина проф. Д. Н. Наследовым и комиссией преподавателей Рязанского радиотехнического института под председательством проф. А. Н. Текучева. За ценные замечания рецензентов авторы приносят им свою благодарность.

Большой труд по редактированию рукописи выполнила канд. техн. наук Я. И. Панова, а ценную помощь в подготовке рукописи оказала Г. И. Пантелеева; авторы выражают им также свою благодарность.

Все замечания и пожелания просьба присылать по адресу: Ленинград, Д-41, Марсово поле, д. 1, Ленинградскому отделению Госэнергоиздата.

Авторы

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Обозначения основных величин, принятые в книге 7

Введение

§ 1. Развитие радиоэлектроники и производства электрорадиоматериалов 9
§ 2. Электромагнитные параметры вещества 15
§ 3. Основные представления о строении материалов 23

РАЗДЕЛ I

ДИЭЛЕКТРИКИ

Глава первая. **Электрические свойства диэлектриков** 39

§ 4. Поляризация диэлектриков . . . . . —
§ 5. Токи смещения и электропроводность диэлектриков 53
§ 6. Потери в диэлектриках 72
§ 7. Пробой диэлектриков 94

Глава вторая. **Физико-механические и химические свойства диэлектриков** 114

§ 8. Гигроскопичность и влагопроницаемость диэлектриков 115
§ 9. Тепловые свойства диэлектриков 120
§ 10. Механические свойства диэлектриков 125
§ 11. Химические свойства диэлектриков и поведение их под воздействием излучений высокой энергии 128

Глава третья. **Органические диэлектрики** 135

§ 12. Основы строения и классификация органических диэлектриков . . . . . —
§ 13. Пластические массы 140
§ 14. Пропиточные материалы, компаунды, лаки и клеи 156
§ 15. Каучуковые материалы 170
§ 16. Целлюлозные материалы и слоистые пластики 175
§ 17. Кремнийорганические полимеры и диэлектрики на их основе 185

Глава четвертая. **Неорганические диэлектрики** 193

§ 18. Радиотехническая керамика 194
§ 19. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и электреты 214
§ 20. Электротехнические стекла 229
§ 21. Слюда и материалы на ее основе 239

РАЗДЕЛ II

ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Глава пятая. **Металлические проводники** 243

§ 22. Классификация и основные свойства проводниковых материалов . . . . . —
§ 23. Материалы высокой проводимости 255
§ 24. Металлы и сплавы различного назначения 265
§ 25. Сплавы высокого электросопротивления 273
§ 26. Непроволочные линейные сопротивления 278

Глава шестая. **Электронные полупроводники** 282

§ 27. Общие сведения о полупроводниках . . . . . —
§ 28. Электропроводность полупроводников 284
§ 29. Термосопротивления (термисторы) 291
§ 30. Нелинейные полупроводниковые сопротивления (НПС или варисторы) 293
§ 31. Выпрямители и детекторы (вентили, диоды) 298
§ 32. Полупроводниковые триоды (транзисторы) 305
§ 33. Фотоэлементы и фотосопротивления 307
§ 34. Различные применения полупроводников 310

Глава седьмая. **Магнитные материалы** 315

§ 35. Общие сведения о магнитных свойствах материалов . . . . —
§ 36. Магнитномягкие материалы для низких частот 325
§ 37. Магнитномягкие высокочастотные ферромагнетики 332
§ 38. Магнитнотвердые материалы 342
Литература 347
Алфавитный указатель 348

ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН, ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ

A — атомный вес.
a — константа Видемана — Франца.
B — магнитная индукция.
C — емкость.
c — скорость электромагнитной волны в вакууме; удельная теплоёмкость.
D — электрическая индукция.
d — затухание контура; пьезомодуль.
E — напряженность электрического поля; модуль упругости.
$E_{пр}$ — пробивная напряженность электрического поля.
e — заряд электрона; основание натуральных логарифмов.
F — сила; стойкость к тепловым импульсам.
f — частота.
g — объемная плотность заряда.
H — напряженность магнитного поля; высота.
H_c — коэрцитивная сила.
h — толщина; постоянная Планка.
I — величина тока.
i — плотность тока.
j — $\sqrt{-1}$
K — объемный коэффициент окисления; коэффициент (индекс указывает, какой величины).
k — постоянная Больцмана.
L — индуктивность; освещенность; длина.
l — длина.
M — молекулярный вес.
m — масса.
n — показатель преломления.
n_0 — концентрация носителей заряда.
P — мощность.
P_a — мощность потерь в диэлектриках.
P_h — потери на гистерезис.
P_f — потери от вихревых токов.
P_n — потери на магнитное последействие.
p — давление; удельные потери.
Q — электрический заряд; добротность.
q — электрический заряд; поверхностная плотность заряда.
R — активное сопротивление.
$R_{из}$ — сопротивление изоляции.
r — радиус; активное сопротивление.
S — площадь (поверхность); вектор Умова — Пойнтинга.
T — температура в °К.
t — температура в °С.
U — потенциал; электрическое напряжение.
$U_{пр}$ — пробивное напряжение.
V — объем.
v — скорость.
v_1 — подвижность.
W — энергия.
w — энергия активации.
$w_д$ — энергия диссоциации.
X — постоянная Холла.
Z — полное сопротивление; номер элемента.
z — волновое сопротивление.
α — поляризуемость частицы; коэффициент затухания; температурный коэффициент (индекс указывает, какой величины).
β — коэффициент импульса; коэффициент нелинейности.

γ — удельная электропроводность; удельный вес.

γ_a' — удельная активная электропроводность на данной частоте.

Δ — глубина проникновения поля.

δ — угол диэлектрических потерь.

$\delta_м$ — угол магнитных потерь.

ε — диэлектрическая проницаемость.

ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума.

ε^* — относительная комплексная диэлектрическая проницаемость.

ε' — относительная диэлектрическая проницаемость.

ε'' — коэффициент диэлектрических потерь.

η — динамическая вязкость.

θ — объемная концентрация.

λ — длина волны.

$\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности.

$\lambda_{ср}$ — средняя длина свободного пробега.

μ — магнитная проницаемость; дипольный момент; коэффициент ослабления излучения.

μ_0 — магнитная постоянная вакуума.

μ^* — относительная комплексная магнитная проницаемость.

μ' — упругая относительная магнитная проницаемость.

μ'' — вязкая относительная магнитная проницаемость.

ν — молекулярная концентрация; коэффициент рекомбинации; кинематическая вязкость; частота.

Π — влагопроницаемость.

ρ — удельное электрическое сопротивление; плотность.

ρ_s — удельное поверхностное электрическое сопротивление.

σ — механическая прочность (индекс указывает вид деформации); механическое напряжение; коэффициент теплоотдачи.

τ — время.

τ_0 — постоянная времени (время релаксации).

φ — угол сдвига фаз; коэффициент механического напряжения.

$\psi_в$ — относительная влажность.

ω — угловая частота.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Развитие радиоэлектроники и производства электрорадиоматериалов

Изобретение радио великим русским ученым А. С. Поповым открыло новую эру в развитии науки и техники и прочно вошло во все области экономической, политической и культурной жизни человеческого общества. Владимир Ильич Ленин гениально предвидел особую роль радио, уделял исключительное внимание и оказывал всемерную поддержку развитию радиотехники в нашей стране. Он написал по поводу первых радиопередач, что „газета без бумаги и „без расстояний" будет великим делом".

27 февраля 1919 г. у нас в стране впервые по радио был передан человеческий голос. В двадцатых годах были построены единичные радиостанции, мощность которых составляла всего десятки ватт, а теперь территория Советского Союза покрыта сетью крупных радиовещательных станций, радио проникло во все самые отдаленные уголки нашей Родины; так, количество радиоприемных точек превысило 50 млн.; причем, за годы семилетки оно должно возрасти еще почти на 30 млн. В настоящее время в СССР насчитывается около 3 млн. телевизоров, а к 1965 г. число их должно увеличиться на 12,5 млн., т. е. более чем в четыре раза. Для обеспечения всех абонентов мощность радиовещательных станций за семилетие должна возрасти на 60%, протяженность радиорелейных линий связи в 8,4 раза, а число телевизионных центров в 2,6 раза. Таковы основные контрольные цифры по радиосвязи, радиовещанию и телевидению, предусмотренные семилетним планом развития народного хозяйства, принятым XXI съездом КПСС.

Однако значение современной радиотехники для жизни человеческого общества не ограничивается только радиовещанием и связью; она создала базу для развития смежных отраслей знаний, таких, как радиофизика, радионавигация, радиолокация, радиотелемеханика, радиоастрономия, радиоспектроскопия, радиометеорология, высокочастотная обработка материалов, электронная автоматика производственных процессов, счетно-вычислительная и ядерная ускорительная техника. Все эти науки вместе с основными областями радиотехники объединяются под общим термином р а д и о э л е к т р о н и к а, так как в их

основе лежат электронные процессы, происходящие на радиочастотах.

О выдающихся достижениях отечественной радиоэлектроники свидетельствует создание самого мощного в мире синхрофазотрона

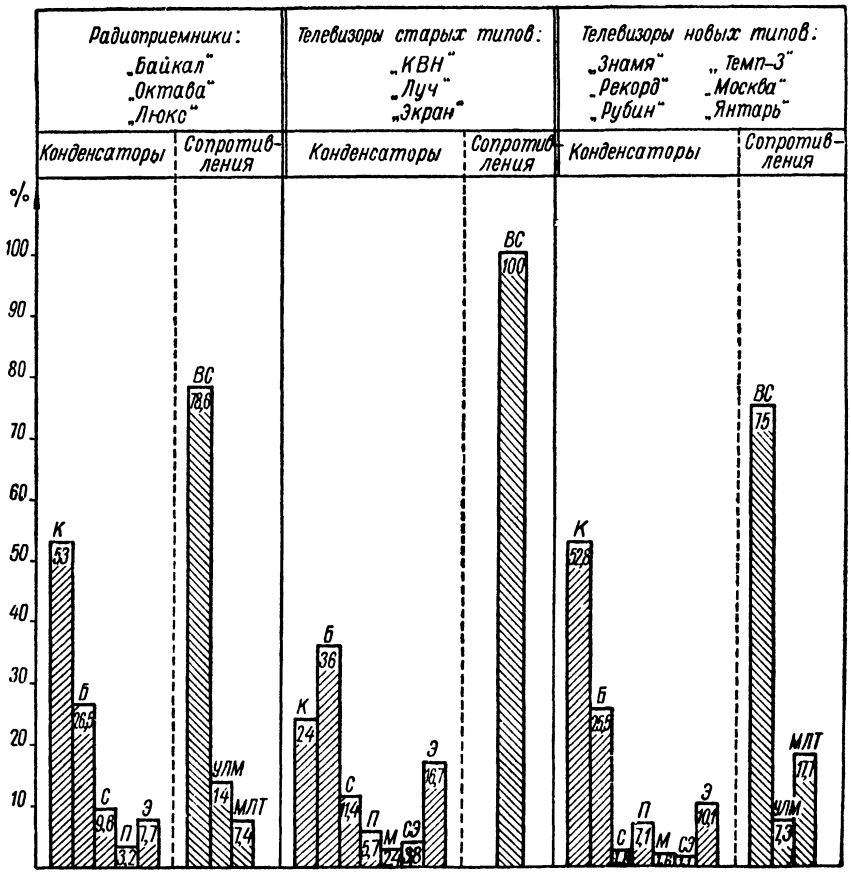


Рис. 1. Процентное соотношение конденсаторов и сопротивлений различных видов в радиоприемниках и телевизорах.

Конденсаторы: *К* — керамические; *Б* — бумажные; *С* — слюдяные; *П* — пленочные; *М* — металлобумажные; *СЭ* — стеклоэмалевые; *Э* — электролитические.
ВС, УЛМ, МЛТ — марки непроволочных сопротивлений.

на 10 млрд. электроно-вольт, различных быстродействующих счетно-вычислительных электронных машин, приборов автоматизации производственных процессов и высокочастотной обработки материалов, радиотелескопов, молекулярных усилителей с низким уровнем тепловых шумов и т. д.

Величественными событиями эпохи построения коммунизма явились успешные запуски искусственных спутников Земли и космических ракет — на Луну и вокруг Луны, которые были выведены на орбиты и управлялись при помощи отечественных радиоприборов; с ними поддерживалась регулярная радиосвязь, причем информацию получали десятки радиостанций Советского Союза. При этом дальность радиосвязи превысила 500 тыс. *км*.

Обеспечение всех направлений развития радиоэлектроники потребовало колоссального роста радиопромышленности, изготовления огромного количества радиодеталей и блоков. За десять лет — с 1948 по 1957 г. выпуск изделий радиопромышленности возрос в 18 раз; за последние восемь лет число выпускаемых электровакуумных приборов увеличилось в 5 раз. Только в 1958 г. радиопромышленность дала стране 3,9 млн. радиоприемников, что превышает довоенный выпуск 1940 г. в 20 раз.

Отечественной радиопромышленностью в многомиллионных и миллиардных количествах изготовляются сопротивления, конденсаторы, катушки индуктивности, электронные лампы и полупроводниковые приборы. Процентные соотношения различных видов конденсаторов и сопротивлений в радиоприемниках и телевизорах показаны на диаграмме, приведенной на рис. 1.

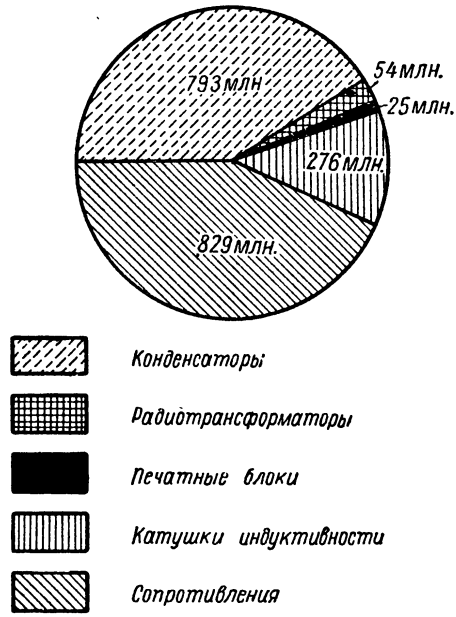


Рис. 2. Изготовление радиодеталей промышленностью США в 1954 г.

Уровень развития радиотехники за рубежом могут в известной мере характеризовать следующие данные: примерно пять лет назад из 3500 американских фирм, выпускающих радиоаппаратуру и ее элементы, свыше 1000 фирм было занято разработкой и изготовлением радиодеталей и электрорадиоматериалов. В год эти фирмы выпускали около 2 млрд. радиодеталей. Распределение этого количества по видам изделий дано на диаграмме, изображенной на рис. 2.

Детали радиоаппаратуры часто применяются в самых сложных условиях низких и высоких температур, ионизированной среды, различных давлений и влажности окружающего воздуха. В качестве примера на рис. 3 указаны температуры, относительные плотности и давления воздуха на разных высотах над земной поверхностью по данным, полученным с помощью метеорологических ракет и искусственных спутников Земли.

В соответствии со сложными условиями эксплуатации к деталям современной радиоаппаратуры предъявляются очень жесткие и разносторонние требования.

1. Радиодетали должны быть малогабаритными и легкими.

2. Детали должны обеспечивать надежную эксплуатацию как при положительных температурах вплоть до $+150 \div +200°$ С, а иногда и выше, так и при отрицательных: от — 60 до — 80° С. При

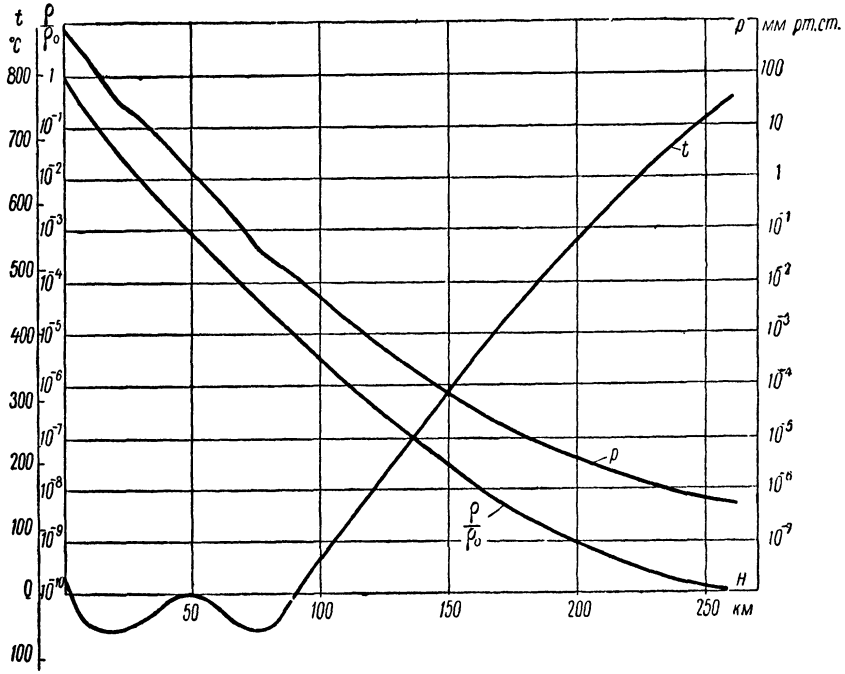


Рис. 3. Средние в пределах земного шара давления (p), температуры (t) и относительные плотности $\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)$ воздуха в зависимости от высоты над уровнем моря (H).

этом чередование многократных температурных циклов не должно вызывать порчи деталей.

3. Радиодетали должны позволять использовать их в тропических условиях — при влажности окружающей среды до 98 % и температуре до $+40°$ С. При этом необходимо предусматривать также мероприятия, предотвращающие развитие плесени, поражения насекомыми и т. д.

4. Изоляционные детали должны иметь низкие диэлектрические потери, высокую электрическую прочность; магнитные сердечники должны обладать по возможности большой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электрическим сопротивлением.

5. Детали радиоаппаратуры должны быть механически прочными, не бояться тряски, вибраций и ударных нагрузок с большими ускорениями.

6. Все радиодетали должны быть надежными в эксплуатации и характеристики их не должны меняться с течением времени.

7. Технология производства деталей должна быть простой, массовой, допускающей автоматизацию их производства.

8. Детали должны быть дешевыми и взаимозаменяемыми.

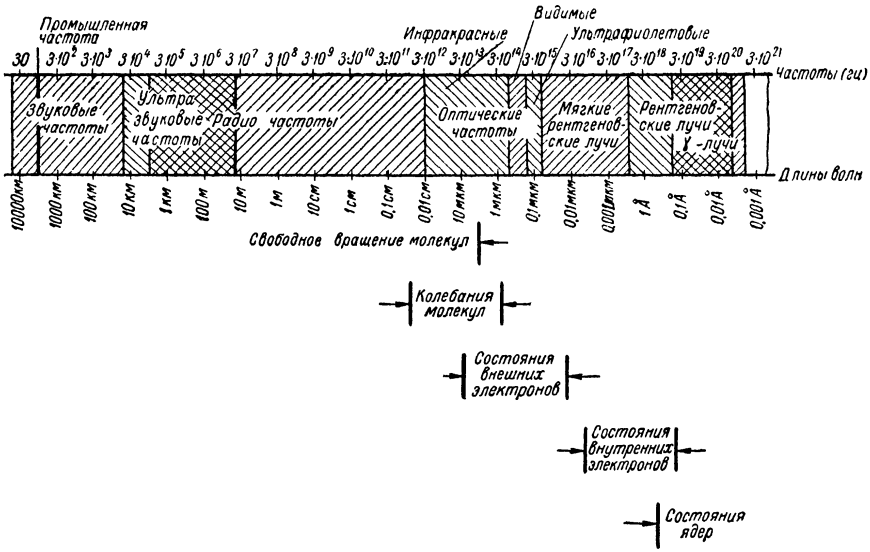


Рис. 4. Шкала электромагнитных волн.

Материалы, используемые для изготовления деталей радиоаппаратуры, в ряде случаев могут оказаться под воздействием электромагнитных волн самых различных частот (рис. 4), многие из которых совпадают с частотами собственных колебаний частиц материалов. Поэтому при конструировании различной современной аппаратуры приходится рассчитывать системы с сосредоточенными и распределенными параметрами.

В первом случае размеры деталей малы по сравнению с длиной волны, и токи в различных сечениях системы в один и тот же момент времени практически одинаковы.

Во втором случае токи в различных сечениях цепи уже не одинаковы и представляют собой функции не только времени, но и размеров системы. К системам с распределенными параметрами принадлежат волноводы, объемные резонаторы и другие детали, применяемые в технике сверхвысоких частот.

Для обеспечения требований, предъявляемых к радиодеталям, необходимо использовать большое количество различных материалов.

Радиопромышленность потребляет обычные конструкционные материалы, такие, как сталь, дерево, фанера и т. д., электротехнические материалы всех типов: проводниковые, полупроводниковые, изоляционные и магнитные. К ним относятся медь, алюминий, селен, германий, гетинакс, фенопласт, слюда, электротехническая сталь и др.

Развитие радиотехники потребовало также создания материалов, сочетающих специфические высокочастотные свойства с необходимыми физико-механическими параметрами. Такие материалы получили название радиотехнических или высокочастотных. К ним относятся, например, полистирол, полиэтилен, высокочастотная керамика, ферриты, магнитодиэлектрики и пр.

Так как радиоаппаратура через открытые колебательные контуры связана с внешним пространством, то специалистам-радиотехникам приходится интересоваться не только свойствами электрорадиоматериалов, идущих на изготовление радиодеталей, но также электрическими и магнитными характеристиками таких сред и веществ, как воздух при различных разрежениях, пресная и морская вода, лед и земля.

Грандиозный рост советской радиоэлектроники и радиопромышленности выдвинул на одно из первых мест проблему быстрейшего развития промышленности электрорадиотехнических материалов, полностью отвечающих новейшим техническим требованиям и изготовляемых из отечественного сырья по самой совершенной технологии.

В наше время новые электрорадиоматериалы редко могут быть получены в результате удачного опыта. Поэтому необходимо предварительное глубокое изучение электрических, физических, механических и химических характеристик таких веществ, которые могли бы быть использованы в качестве технических материалов. Для понимания электрических, магнитных и механических свойств материалов, а также причин их старения необходимо исследовать химический состав и структуру.

Изучение и дальнейшее изыскание необходимых для промышленности электрорадиоматериалов входит в тематику специализированных научно-исследовательских институтов. Новейшая технология изготовления и обработки материалов разрабатывается в опытных цехах институтов и заводов.

Сочетание научно обоснованных требований с реальными возможностями производства создало в нашей стране те благоприятные условия, благодаря которым промышленность электрорадиоматериалов в последние годы сумела достигнуть больших успехов.

Решающее значение для дальнейшего развития новых материалов имеют постановления майского пленума ЦК КПСС об ускорении развития химической промышленности и особенно производства синтетических материалов, а также контрольные цифры развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 годы, принятые XXI съездом КПСС, в которых указано, что производство должно развиваться „на базе использования последних достижений и открытий науки

и техники, особенно радиоэлектроники, сверхпроводимости, ультразвука, радиоактивных изотопов, полупроводников, ядерной энергии и т. д." с широким применением „материалов с улучшенными и специальными характеристиками и свойствами, таких, как коррозийноустойчивые и жаропрочные металлы, легкие сплавы, пластические массы, полупроводниковые, ферромагнитные и другие материалы".

Серьезное значение качества материалов для современной электротехники и радиоэлектроники обусловило необходимость подготовки специалистов по профилю „Диэлектрики и полупроводники" и включения в план подготовки инженеров-радистов изучения специального курса „Электрорадиоматериалы". Этот курс ставит перед собой следующие задачи:

1) рассмотрение теоретических основ, из которых следует исходить при изучении и испытании материалов, применяемых в радиоэлектронике;

2) установление классификации электрорадиотехнических материалов по их назначению, составу и свойствам;

3) изучение основных характеристик, служащих для оценки пригодности материалов при их использовании в радиоэлектронике;

4) изложение основных особенностей технологии электрорадиоматериалов;

5) указание перспектив развития и совершенствования электрорадиоматериалов.

§ 2. Электромагнитные параметры вещества

Основные сведения

Как известно из курсов физики и теоретических основ электротехники, электромагнитное поле в изотропных средах характеризуется системой дифференциальных уравнений Максвелла:

$$\left.\begin{aligned} [\nabla \boldsymbol{H}] &= \gamma \boldsymbol{E} + \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \tau}; \\ [\nabla \boldsymbol{E}] &= -\mu \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial \tau}; \\ (\nabla \boldsymbol{D}) &= g; \\ (\nabla \boldsymbol{B}) &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

В этих уравнениях постоянными по величине характеристиками среды (материала) считаются:

ε — диэлектрическая проницаемость;

μ — магнитная проницаемость;

γ — удельная электропроводность.

Время обозначено τ, а объемная плотность зарядов — g.

При гармоническом изменении поля во времени:

$$\left.\begin{aligned}\dot{E} &= E_m e^{j(\omega\tau+\varphi)},\\ \dot{H} &= H_m e^{j(\omega\tau+\theta)},\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

уравнения Максвелла принимают вид:

$$\left.\begin{aligned}[\nabla\dot{H}] &= (\gamma + j\omega\varepsilon)\dot{E},\\ [\nabla\dot{E}] &= -j\omega\mu\dot{H}.\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

При распространении электромагнитного поля происходит перенос энергии. Если в объеме V, ограниченном поверхностью S, имеется запас электрической и магнитной энергий, соответственно равных

$$\left.\begin{aligned}W_e &= \int_V \frac{\varepsilon E^2}{2}\,dV,\\ W_m &= \int_V \frac{\mu H^2}{2}\,dV,\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

и происходит убыль этого запаса с течением времени:

$$-\frac{\partial}{\partial\tau}(W_e + W_m) = \int_V \gamma E^2 dV + \int_S [EH]_n\,dS, \tag{5}$$

то первый член правой части уравнения (5) выражает энергию, переходящую в данном объеме в тепло за единицу времени, а второй член — энергию, выходящую за пределы объема через его поверхность в единицу времени. Плотность потока энергии в единицу времени определяется вектором Умова — Пойнтинга:

$$S = [E \cdot H]. \tag{6}$$

Электромагнитные волны в совершенном диэлектрике

В однородном совершенном диэлектрике при $\gamma \approx 0$ и $g = 0$ уравнения Максвелла принимают вид:

$$\left.\begin{aligned}&[\nabla H] = \varepsilon\frac{\partial E}{\partial\tau};\\ &[\nabla E] = -\mu\frac{\partial H}{\partial\tau};\\ &(\nabla E) = 0;\\ &(\nabla H) = 0.\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

Они могут быть приведены к волновым уравнениям:

$$\left.\begin{aligned}\nabla^2 H &= \varepsilon\mu\frac{\partial^2 H}{\partial\tau^2};\\ \nabla^2 E &= \varepsilon\mu\frac{\partial^2 E}{\partial\tau^2}.\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

В частном случае, если поле изменяется только вдоль оси X и вектор $\boldsymbol{E}$ направлен по оси Y (рис. 5), то решения уравнений (7) выражаются функциями:

$$\boldsymbol{H}_z = \frac{1}{z}\left\{Ae^{j\omega(\tau - \sqrt{\varepsilon\mu}\,x)} - Be^{j\omega(\tau + \sqrt{\varepsilon\mu}\,x)}\right\};$$

$$\boldsymbol{E}_y = Ae^{j\omega(\tau - \sqrt{\varepsilon\mu}\,x)} + Be^{j\omega(\tau + \sqrt{\varepsilon\mu}\,x)}. \qquad (9)$$

При гармоническом изменении во времени $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{H}$ уравнения Максвелла для совершенного диэлектрика принимают вид:

$$\left.\begin{aligned}[\nabla\dot{\boldsymbol{H}}] &= j\omega\varepsilon\dot{\boldsymbol{E}};\\ [\nabla\dot{\boldsymbol{E}}] &= -j\omega\mu\dot{\boldsymbol{H}}.\end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

На рис. 5 показана плоская электромагнитная волна в совершенном диэлектрике при гармоническом изменении $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{H}$ и отсутствии волны, движущейся в отрицательном направлении оси X.

Из выражений (9) и (10) устанавливается связь между электрической и магнитной составляющими волны.

Электрическая и магнитная составляющие совпадают по фазе во времени.

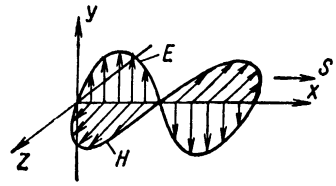


Рис. 5. Плоская электромагнитная волна в совершенном диэлектрике.

Векторы $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{H}$ взаимно перпендикулярны, соотношение между их величинами

$$\frac{E}{H} = z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \qquad (11)$$

носит название волнового сопротивления среды и имеет размерность сопротивления.

Энергия электромагнитной волны состоит из двух равных частей ($W_e = W_m$) и распространяется вдоль оси X.

Фазовая скорость распространения волны в диэлектрике меньше скорости распространения в вакууме и равна:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}, \qquad (12)$$

т. е. длина волны в диэлектрике короче, чем в вакууме.

Для вакуума и совершенного диэлектрика, используя систему единиц МКSA, получают величины, сведенные в табл. 1.

Электромагнитные волны в несовершенном диэлектрике

При гармоническом изменении поля с частотой ω в среде (материале), обладающей заметной электропроводностью ($\gamma > 0$) и замедленными

Таблица 1

Основные величины

Вакуум				Совершенный диэлектрик	
ε_0, *ф/м*	μ_0, *гн/м*	v, *м/сек*	z, *ом*	ε, *ф/м*	μ, *гн/м*
$\frac{10^{-9}}{36\pi}$	$4\pi\cdot10^{-7}$	$3\cdot10^{8}$	377	$\varepsilon_0\varepsilon'$	$\mu_0\mu'$

Примечание. ε' и μ' — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды (материала).

механизмами поляризации (см. § 4 и 5), происходящими с рассеянием энергии, уравнения Максвелла (3) запишутся:

$$\left.\begin{aligned}[\nabla \dot{H}] &= (\gamma'_a + j\omega\varepsilon)\dot{E},\\ [\nabla \dot{E}] &= -j\omega\mu\dot{H},\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

где γ'_a — удельная активная электропроводность на данной частоте, учитывающая как сквозную проводимость, так и активные составляющие поляризационных токов; выражена в $ом^{-1}\cdot м^{-1}$.

Выражение (13) можно сохранить в той же форме (10), что и для идеального диэлектрика, введя вместо ε комплексную диэлектрическую проницаемость $\overset{*}{\varepsilon}$.

Из сравнения первых уравнений систем (13) и (10) видно, что для этого нужно:

$$\gamma'_a + j\omega\varepsilon = j\omega\overset{*}{\varepsilon}; \tag{14}$$

отсюда

$$\overset{*}{\varepsilon} = \varepsilon - \frac{j\gamma'_a}{\omega} = \varepsilon_0\varepsilon' - \frac{j\gamma'_a}{\omega} = \varepsilon_0\left(\varepsilon' - \frac{j\gamma'_a}{\omega\varepsilon_0}\right) = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon''), \tag{15}$$

где

$$\varepsilon'' = \frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon_0}. \tag{16}$$

Отношение двух составляющих комплексной диэлектрической проницаемости равно отношению активной проводимости несовершенного диэлектрика и его емкостной проводимости:

$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon_0\varepsilon'} = \frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon}. \tag{17}$$

Как будет показано ниже (§ 6), отношение этих проводимостей равно тангенсу угла диэлектрических потерь диэлектрика δ:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon}. \tag{17'}$$

При использовании $\overset{*}{\varepsilon}$ волновые уравнения имеют вид:

$$\left.\begin{aligned}\nabla^2\dot{E} &= -\overset{*}{\varepsilon}\mu\omega^2\dot{E};\\ \nabla^2\dot{H} &= -\overset{*}{\varepsilon}\mu\omega^2\dot{H}\end{aligned}\right\} \tag{18}$$

Для плоской волны, распространяющейся в направлении X, решение уравнений (18) выражается функциями

$$\left.\begin{aligned}\dot{E}_y &= E_m e^{-\alpha x} e^{j\omega\left(\tau - \frac{x}{v}\right)},\\ \dot{H}_z &= H_m e^{-\alpha x} e^{\left(j\omega\tau - \frac{x}{v} - \frac{\vartheta}{\omega}\right)}.\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

Как видно из этих уравнений, вследствие наличия в среде проводимости происходит рассеяние энергии и одинаковое затухание амплитуд обеих составляющих электромагнитной волны.

Коэффициент затухания электромагнитной волны в диэлектрике с потерями равен:

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{\varepsilon\mu\left(\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}-1\right)}}{\sqrt{2}} =$$

$$= 1{,}48\cdot 10^{-8} f\sqrt{\varepsilon'\left(\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}-1\right)}, \tag{20}$$

где f — частота;

μ — практически равно μ_0.

Фазовая скорость распространения волны будет:

$$v = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\varepsilon\mu\left(\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}+1\right)}} = \frac{4{,}23\cdot 10^8}{\sqrt{\varepsilon'\left(\sqrt{1+\operatorname{tg}^2\delta}+1\right)}}. \tag{21}$$

Экспериментально установлено, что на высоких частотах в несовершенных диэлектриках фазовые скорости волн различной частоты не одинаковы (явление дисперсии).

Как видно из выражения (21), явление дисперсии указывает на зависимость параметров материалов ε и γ от частоты.

Электрическая и магнитная составляющие волны отличны по фазе на

$$\vartheta = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\delta}{2}. \tag{22}$$

На рис. 6 показана затухающая электромагнитная волна в несовершенном диэлектрике.

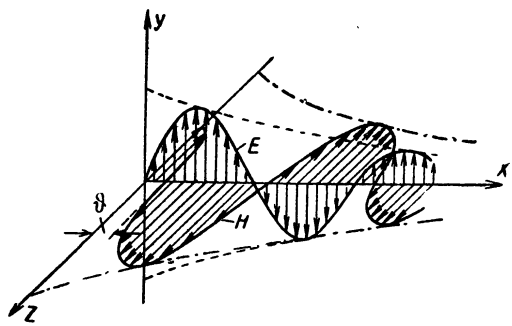


Рис. 6. Затухающая плоская электромагнитная волна в несовершенном диэлектрике.

Одно и то же вещество (среда) при разных частотах в зависимости от соотношения активной и емкостной проводимостей может

представлять собой либо диэлектрик, либо полупроводник, либо технический (несовершенный) проводник.

Обычно принято считать, что условие

$$\frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon} = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \operatorname{tg}\delta < 0{,}01 \qquad (23)$$

дает право называть вещество при данной частоте реальным диэлектриком; условие

$$\frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon} > 100 \qquad (24)$$

определяет технические проводники. Пределами

$$100 > \frac{\gamma'_a}{\omega\varepsilon} > 0{,}01 \qquad (25)$$

охватываются полупроводники.

Исходя из этих соотношений, составлена табл. 2.

Таблица 2

Принадлежность некоторых сред к различным электротехническим категориям в зависимости от частоты

Среда	γ'_a, $ом^{-1} \cdot м^{-1}$	$\rho_{экв}$, $ом \cdot см$	ε_a, $ф \cdot м^{-1}$	ε'	Частота (*гц*), при которой среда может считаться		
					техническим проводником	полупроводником	реальным диэлектриком
1	2	3	4	5	6		7
Пресная вода . .	10^{-3}	10^5	$7{,}1 \cdot 10^{-10}$	81	$< 2{,}2 \cdot 10^3$		$> 2{,}2 \cdot 10^7$
Сырая почва . . .	10^{-3}	10^5	$0{,}9 \cdot 10^{-10}$	10,2	$< 1{,}8 \cdot 10^4$		$> 1{,}8 \cdot 10^8$
Сухая почва . . .	10^{-5}	10^7	$0{,}45 \cdot 10^{-10}$	5,1	$< 3{,}6 \cdot 10^2$		$> 3{,}6 \cdot 10^6$

Примечание. Графы 3 и 5 введены в таблицу для получения более наглядных представлений о параметрах сред, которые условно приняты не зависящими от частоты.

Электромагнитные волны в техническом проводнике

Проводники, применяющиеся в технике, можно рассматривать как материалы, у которых $\gamma \gg \omega\varepsilon$, т. е. токами смещения можно пренебречь по сравнению с токами проводимости. При этом уравнения Максвелла принимают вид:

$$\left.\begin{aligned} [\nabla \boldsymbol{H}] &= \gamma \boldsymbol{E}; \\ [\nabla \boldsymbol{E}] &= -\mu \frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial \tau}. \end{aligned}\right\} \qquad (26)$$

Преобразование этих уравнений дает:

$$\left.\begin{aligned}\nabla^2 H &= \gamma\mu \frac{\partial H}{\partial \tau};\\ \nabla^2 E &= \gamma\mu \frac{\partial E}{\partial \tau}.\end{aligned}\right\} \tag{27}$$

При гармоническом изменении поля во времени уравнения (27) можно записать:

$$\left.\begin{aligned}\nabla^2 \dot{H} &= j\omega\gamma\mu \dot{H};\\ \nabla^2 \dot{E} &= j\omega\gamma\mu \dot{E}.\end{aligned}\right\} \tag{28}$$

Решение уравнений (28) имеет такой же вид, как и в случае волн в несовершенном диэлектрике (19).

Так как в данном случае $\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ представляет собой большую величину, то, пренебрегая по сравнению с ней единицами в выражениях (20) и (21) и считая $\varepsilon' = 1$, получаем, что коэффициент затухания α и фазовая скорость волны v в материале будут равны:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\gamma\mu}{2}}; \tag{29}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{\gamma\mu}}. \tag{30}$$

Из выражения (19) видно, что коэффициент затухания α имеет размерность (длина)$^{-1}$.

Таблица 3

Электромагнитные параметры проводящих сред при различных частотах

Среда	f, *гц*	λ, *м*	v, *м/сек*	Δ, *м*
Морская вода	50	224	$1{,}1\cdot10^4$	36,6
	800	56	$4{,}5\cdot10^4$	8,9
	10^6	1,6	$1{,}6\cdot10^6$	0,25
Пресная вода	50	$1{,}4\cdot10^4$	$7{,}1\cdot10^5$	$2{,}3\cdot10^3$
	800	$3{,}6\cdot10^3$	$2{,}8\cdot10^6$	575
Сырая почва	50	$1{,}4\cdot10^4$	$7{,}1\cdot10^5$	$2{,}3\cdot10^3$
	800	$3{,}6\cdot10^3$	$2{,}8\cdot10^6$	575
Сухая почва	50	$1{,}4\cdot10^5$	$7{,}1\cdot10^6$	$2{,}3\cdot10^4$

Примечание. Для всех сред $\mu = \mu_0$. Электропроводность соответствует табл. 2.

Электромагнитное поле проникает в проводник извне и тем быстрее затухает, чем выше частота, чем больше электропроводность и магнитная проницаемость материала. Следствием этого является неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника, или так называемый поверхностный эффект. Когда волна проникает в про-

водник на глубину $x=\Delta=\frac{1}{\alpha}$, амплитуда ее уменьшается в e раз. Эту величину называют глубиной проникновения поля.

Глубина проникновения поля, вычисленная по выражению

$$\Delta=\sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}}=\frac{1}{\sqrt{\pi f\gamma\mu}}, \tag{31}$$

и другие электромагнитные параметры сред при частотах, когда их можно считать проводниками, приведены в табл. 3.

В совершенном проводнике, у которого $\gamma=\infty$, электромагнитного поля не может быть, так как при этом $\alpha=\infty$, а $\Delta=0$. В общем случае от границ раздела различных сред электромагнитные волны отражаются частично, от совершенного проводника наблюдается полное отражение волн; в полупространстве, ограниченном совершенным проводником, образуются чисто стоячие волны (рис. 7).

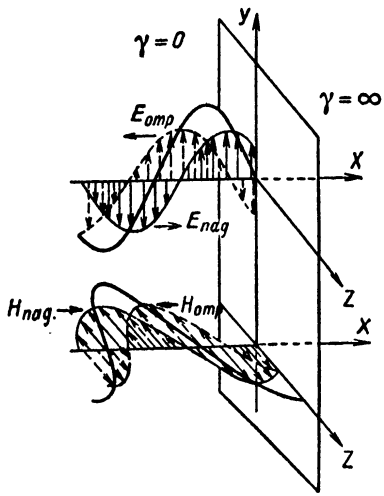


Рис. 7. Образование стоячих волн при отражении от поверхности совершенного проводника.

Особенности электромагнитных характеристик реальных материалов

Помимо рассмотренных выше случаев, современной радиотехнике приходится иметь дело с такими материалами, как, например, металлические ферромагнетики, магнитодиэлектрики, ферриты, у которых нельзя допускать, что $\mu=\mu_0$, так как, во-первых, оно велико, а во-вторых, имеют место потери энергии на гистерезис и вихревые токи. В этом случае приходится пользоваться понятием о комплексной магнитной проницаемости:

$$\dot{\mu}=\mu'-j\mu''. \tag{32}$$

Вещественную часть — μ' — называют упругой магнитной проницаемостью, мнимую — μ'' — вязкой магнитной проницаемостью.

В реальных материалах γ, ε и μ являются функциями частоты, выяснение вида которых удается произвести только на основе изучения строения вещества и структуры отдельных материалов. Для очень большого числа веществ γ, ε и μ не зависят от напряженностей электрического и магнитного полей, и такие материалы называют линейными, однако у ферромагнетиков $\mu=F_1(H)$, у сегнетоэлектриков $\varepsilon=F_2(E)$, у материалов для варисторов $\gamma=F_3(E)$.

Эти аномальные по своему поведению в электромагнитном поле материалы называют нелинейными.

Во всех предыдущих случаях мы предполагали, что вещества являются однородными и изотропными. В реальных условиях очень часто приходится иметь дело с анизотропными твердыми материалами кристаллической структуры или материалами неоднородными, состоящими из нескольких кристаллообразований и аморфной фазы.

Главнейшие представления физики и химии о строении вещества являются основами для изучения курса современных электрорадиоматериалов.

§ 3. Основные представления о строении материалов

Виды связи

Основными элементарными частицами, из которых построены все известные нам вещества, являются протоны, нейтроны и электроны.

Из протонов и нейтронов состоят атомные ядра; электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд ядра.

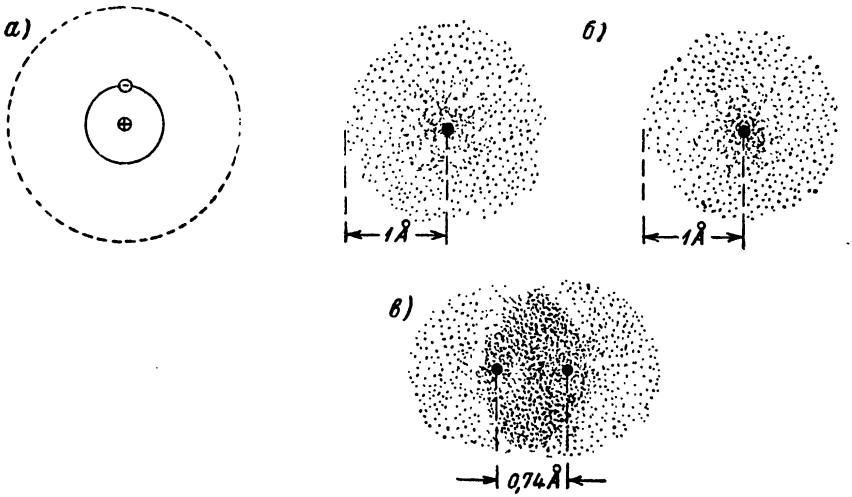


Рис. 8. Структуры атома и молекулы водорода: *а* — простейшая планетарная модель водородного атома (пунктиром показана разрешенная, но не занятая электроном в невозбужденном состоянии атома, орбита); *б* — квантово-механическая модель электронной структуры двух уединенных атомов водорода; *в* — то же, для молекулы водорода (точками показана плотность заряда электрона).

Строение ядер атомов и периодичность заполнения оболочек электронами отражены в таблице Д. И. Менделеева (табл. 4).

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Периоды	Электронные слои	Группы I	II	III	IV	V
1	K	**H** 1 1,0080 Водород 1				
2	L 2 K 2	**Li** 3 6,940 Литий 1 2	**Be** 4 9,013 Бериллий 2 2	3 10,82 **B** Бор 2 3	**C** 6 12,011 Углерод 4 2	**N** 7 14,008 Азот 5 2
3	M 1 L 8 K 2	**Na** 11 22,991 Натрий 1 8 2	**Mg** 12 24,32 Магний 2 8 2	**Al** 13 26,98 Алюминий 3 8 2	**Si** 14 28,09 Кремний 4 8 2	**P** 15 30,975 Фосфор 5 8 2
4	N 1 M 8 L 8 K 2	**K** 19 39,100 Калий 1 8 8 2	**Ca** 20 40,08 Кальций 2 8 8 2	**Sc** 21 44,96 Скандий 2 9 8 2	**Ti** 22 47,90 Титан 2 10 8 2	**V** 23 50,95 Ванадий 2 11 8 2
	N 1 M 18 L 8 K 2	**Cu** 29 63,54 Медь 1 18 8 2	**Zn** 30 65,38 Цинк 2 18 8 2	**Ga** 31 69,72 Галлий 3 18 8 2	**Ge** 32 72,60 Германий 4 18 8 2	**As** 33 74,91 Мышьяк 5 18 8 2
5	O 1 N 8 M 18 L 8 K 2	**Rb** 37 85,48 Рубидий 1 8 18 8 2	**Sr** 38 87,63 Стронций 2 8 18 8 2	**Y** 39 88,92 Иттрий 2 9 18 8 2	**Zr** 40 91,22 Цирконий 2 10 18 8 2	**Nb** 41 92,91 Ниобий 1 12 18 8 2
	O 1 N 18 M 18 L 8 K 2	**Ag** 47 107,880 Серебро 1 18 18 8 2	**Cd** 48 112,41 Кадмий 2 18 18 8 2	**In** 49 114,82 Индий 3 18 18 8 2	**Sn** 50 118,70 Олово 4 18 18 8 2	**Sb** 51 121,76 Сурьма 5 18 18 8 2
6	P 1 O 8 N 18 M 18 L 8 K 2	**Cs** 55 132,91 Цезий 1 8 18 18 8 2	**Ba** 56 137,36 Барий 2 8 18 18 8 2	* **La** 57 138,92 Лантан 2 9 18 18 8 2	**Hf** 72 178,50 Гафний 2 10 32 18 8 2	**Ta** 73 180,95 Тантал 2 11 32 18 8 2
	P 1 O 18 N 32 M 18 L 8 K 2	**Au** 79 197,00 Золото 1 18 32 18 8 2	**Hg** 80 200,61 Ртуть 2 18 32 18 8 2	**Tl** 81 204,39 Таллий 3 18 32 18 8 2	**Pb** 82 207,21 Свинец 4 18 32 18 8 2	**Bi** 83 209,00 Висмут 5 18 32 18 8 2
7	Q 1 P 8 O 18 N 32 M 18 L 8 K 2	**Fr** 87 (223) Франций 1 8 18 32 18 8 2	**Ra** 88 226,05 Радий 2 8 18 32 18 8 2	** **Ac** 89 227 Актиний 2 9 18 32 18 8 2	104	

* Лантаны

Ce 58 140,13 Церий 2 8 20 18 8 2	**Pr** 59 140,92 Празеодим 2 8 21 18 8 2	**Nd** 60 144,27 Неодим 2 8 22 18 8 2	**Pm** 61 (145) Прометий 2 8 23 18 8 2	**Sm** 62 150,35 Самарий 2 8 24 18 8 2	**Eu** 63 152,0 Европий 2 8 25 18 8 2	**Gd** 64 157,26 Гадолиний 2 8 25 18 8 2

** Актины

Th 90 232,05 Торий 2 10 18 32 18 8 2	**Pa** 91 231 Протактиний 2 9 20 32 18 8 2	**U** 92 238,07 Уран 2 9 21 32 18 8 2	**Np** 93 (237) Нептуний 2 8 23 32 18 8 2	**Pu** 94 (244) Плутоний 2 8 24 32 18 8 2	**Am** 95 (243) Америций 2 8 25 32 18 8 2	**Cm** 96 (248) Кюрий 2 9 25 32 18 8 2

Таблица 4

ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

элементов

VI	VII	VIII			0
	(H)				He 2 4,003 Гелий 2
8 6 16,0000 O 2 Кислород	9 7 19,00 F 2 Фтор				Ne 10 20,183 Неон 8 2
6 16 S 8 32,066 2 Сера	7 17 Cl 8 35,457 2 Хлор				Ar 18 8 39,944 8 Аргон 2
Cr 24 1 13 52,01 8 Хром 2	Mn 25 2 13 54,94 8 Марганец 2	Fe 26 2 14 55,85 8 Железо 2	Co 27 2 15 58,94 8 Кобальт 2	Ni 28 2 16 58,71 8 Никель 2	
6 18 34 8 Se 78,96 2 Селен	7 18 35 8 Br 79,916 2 Бром				Kr 36 8 18 83,80 8 Криптон 2
Mo 42 1 13 95,95 18 Молибден 8 2	Tc 43 2 13 (99) 18 Технеций 8 2	Ru 44 1 15 101,1 18 Рутений 8 2	Rh 45 1 16 102,91 18 Родий 8 2	Pd 46 0 18 106,4 18 Палладий 8 2	
6 18 18 52 8 127,61 Te 2 Теллур	7 18 18 53 8 126,91 J 2 Иод				Xe 54 8 18 131,3 18 Ксенон 8 2
W 74 2 12 32 183,86 18 Вольфрам 8 2	Re 75 2 13 32 186,22 18 Рений 8 2	Os 76 2 14 32 190,2 18 Осмий 8 2	Ir 77 2 15 32 192,2 18 Иридий 8 2	Pt 78 1 17 32 195,09 18 Платина 8 2	
6 18 32 18 84 8 210 Po 2 Полоний	7 18 32 18 85 8 (210) At 2 Астатин				Rn 86 8 18 32 222 18 Радон 8 2

ды 58—71

Tb 65 2 8 27 158,93 18 Тербий 8 2	Dy 66 2 8 28 162,51 18 Диспрозий 8 2	Ho 67 2 8 29 164,94 18 Гольмий 8 2	Er 68 2 8 30 167,27 18 Эрбий 8 2	Tu 69 2 8 31 168,94 18 Тулий 8 2	Yb 70 2 8 32 173,04 18 Иттербий 8 2	Lu 71 2 9 32 174,99 18 Лютеций 8 2

ды 90—103

Bk 97 2 8 27 (247) 32 Берклий 18 8 2	Cf 98 2 8 28 (249) 32 Калифорний 18 8 2	Es 99 2 8 29 (253) 32 Эйнштейний 18 8 2	Fm 100 2 8 30 (255) 32 Фермий 18 8 2	Md 101 2 8 31 (256) 32 Менделеевий 18 8 2	No 102 2 8 32 (254) 32 Нобелий 18 8 2	103

Атом водорода состоит из одного протона и одного электрона. В простейшей планетарной модели атома этот электрон-шарик вращается по орбите вокруг ядра атома (рис. 8, *а*). В квантовой механике движение электрона описывается волновой функцией, облада-

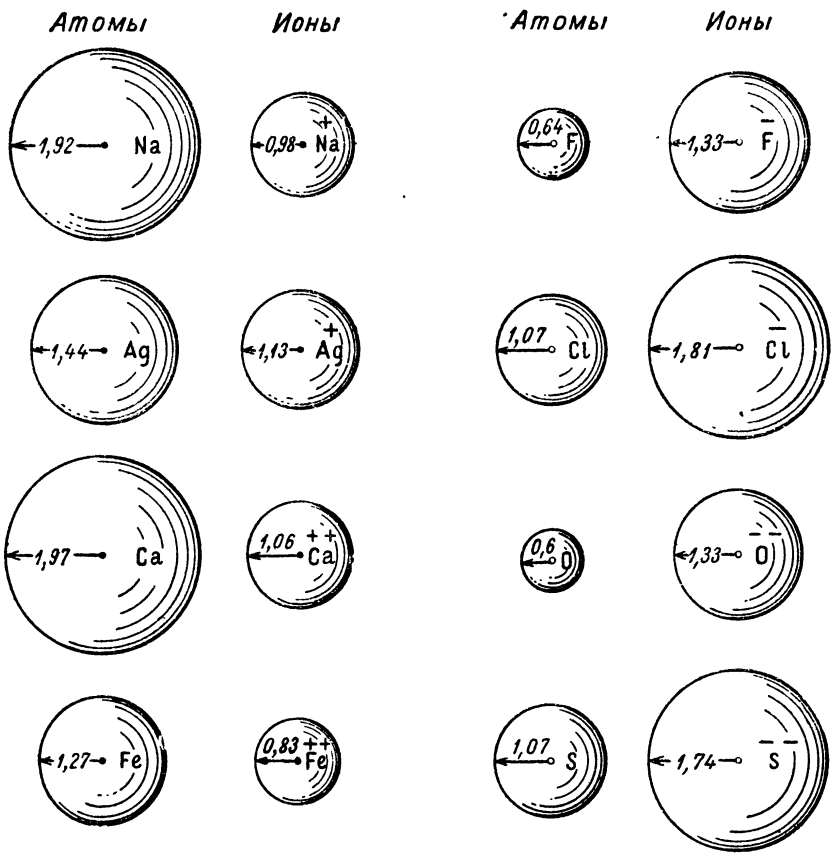


Рис. 9. Размеры атомов, положительных и отрицательных ионов некоторых элементов в Å.

ющей в изолированном атоме сферической симметрией, так что заряд электрона диффузно распределен, образуя размытое облако (рис. 8, *б*).

Газы, жидкие и твердые тела могут состоять из атомов, молекул или ионов. Размеры атомов — порядка ангстремов (1 Å $= 10^{-8}$ *см*), размеры положительных ионов — атомов, лишенных части электронов, меньше, чем атомов; размеры отрицательных ионов, присоединивших дополнительные электроны, больше, чем размеры соответствующих атомов. Это положение иллюстрируется рис. 9.

Молекулы газов содержат различное число атомов, как это видно из табл. 5.

В приведенных в табл. 5 веществах связывание нескольких атомов в молекулу достигается за счет электронов, становящихся

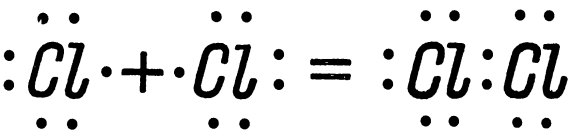


Рис. 10. Гомеополярная связь в молекуле хлора.

общими для всех атомов. При этом плотность электронного облака между положительно заряженными ядрами становится наибольшей, что и связывает их в молекулу. Пример молекулы H_2 дан на рис. 8, *в*. Такой вид связи получил название гомеополярной или ковалентной связи.

В молекуле Cl_2 два атома хлора, имеющие на внешнем слое по семи электронов, принимают устойчивую конфигурацию путем объединения двух общих электронов (рис. 10). В результате каждый атом повышает на единицу число электронов в своем валентном слое. Поскольку этот слой полностью заполняется, дальнейшее усложнение молекулы не может иметь места.

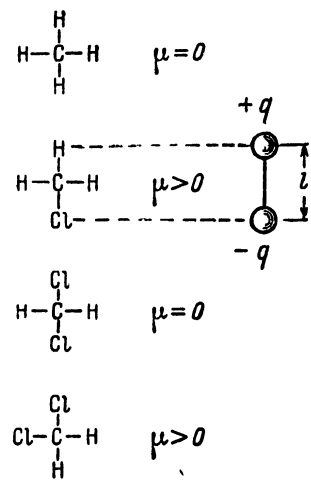


Рис. 11. Примеры нейтральных (симметричных) и дипольных (несимметричных) молекул.

Молекулы с гомеополярной связью могут быть нейтральными или полярными (дипольными) в соответствии с симметричным или асимметричным строением. Молекулы, в которых центры положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются нейтральными. Если же в отдельных молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются полярными или дипольными.

Примеры нейтральных и дипольных молекул производных метана показаны на рис. 11.

Полярная молекула характеризуется величиной дипольного момента, который определяется произведением заряда на расстояние между центрами положительных и отрицательных зарядов:

$$\mu = ql. \qquad (33)$$

Заряд q выражается величиной порядка $2 \cdot 10^{-19} к$, расстояние l составляет $(1 \div 3) \cdot 10^{-8} см$. Поэтому дипольные моменты молекул μ обычно имеют величину порядка $5 \cdot 10^{-29} \div 10^{-30}$ единиц MKSA.

Таблица 5

Примеры молекул различных газов

Одноатомные	Двухатомные	Трехатомные	Четырехатомные	Пятиатомные
He, Ar, Ne	H_2, N_2, O_2, Cl_2, CO	CO_2, H_2O (пар)	NH_3	CH_4

В таблице 6 приведены значения дипольных моментов молекул некоторых веществ.

Таблица 6

Дипольные моменты молекул

Вещество	Химическая формула	Дипольный момент в единицах MKSA
Сероуглерод	CS_2	0
Четыреххлористый углерод	CCl_4	0
Бензол	C_6H_6	0
Этиловый спирт	C_2H_5OH	$0{,}57 \cdot 10^{-29}$
Вода	H_2O	$0{,}62 \cdot 10^{-29}$
Мочевина	$H_2N \diagdown C=O \diagup H_2N$	$1{,}5 \cdot 10^{-29}$

Молекулы органических соединений могут состоять из небольшого числа атомов или из десятков, сотен и многих тысяч атомов, образуя как жидкие, так и твердые материалы.

Молекулы, способные при определенных условиях объединяться, образуя более крупные молекулы, называются м о н о м е р н ы м и (рис. 12, *а*).

Молекулы, получившиеся при соединении друг с другом мономерных молекул, представляют собой п о л и м е р н ы е м о л е к у л ы. Они могут быть в виде цепочек, вытянутых по одной координате, зигзагообразных или закрученных. Такие полимерные молекулы называются л и н е й н ы м и (рис. 12, *б*). У других веществ полимерные молекулы могут быть развиты в пространстве по нескольким координатам и носят название п р о с т р а н с т в е н н ы х (рис. 12, *в*).

Основоположником учения о строении сложных органических молекул является А. М. Бутлеров.

Гомеополярная связь наблюдается и у твердых кристаллических веществ неорганического происхождения, решетки которых построены из атомов. Примером такого кристалла служит алмаз; его структура показана на рис. 13.

Второй вид связи — и о н н а я с в я з ь — определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. Твердые

тела ионной структуры характеризуются повышенной механической прочностью и относительно высокой температурой плавления. Типич-

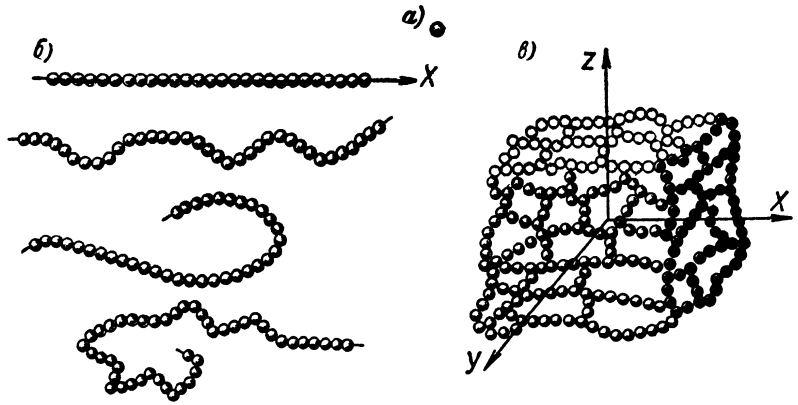


Рис. 12. Строение мелекул высокомолекулярных органических соединений. *а* — мономерная молекула; *б* — виды линейных полимерных молекул; *в* — пространственная полимерная молекула.

ными примерами ионных кристаллов являются галоидные соли щелочных металлов.

На рис. 14 показана структура хлористого натрия и хлористого цезия. Плотная упаковка ионов первого и неплотная — второго схематически изображены на этом же рисунке.

Русский ученый Е. С. Федоров почти на 40 лет раньше, чем были найдены методы рентгеноструктурного анализа, рассчитал возможные расположения частиц в кристаллических решетках различных веществ. Геометрически возможны лишь 14 различных пространственных решеток, являющихся основой шести кристаллических систем, приведенных на рис. 15 и в табл. 7.

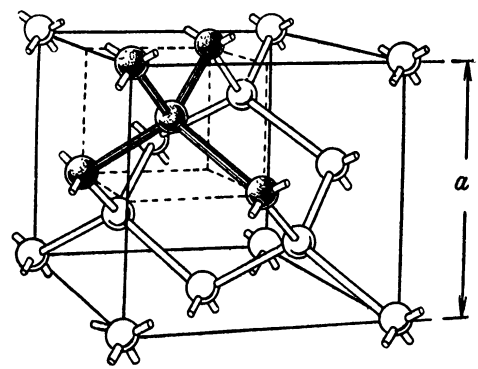


Рис. 13. Структура алмаза, из которой видно, каким образом каждый атом образует четыре связи со своими ближайшими соседями.

Иногда считают ромбоэдрическую, или тригональную систему ($a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$) самостоятельной седьмой системой.

Геометрическая классификация кристаллов недостаточна для разделения структур, кажущихся тождественными. Они могут обнаруживать

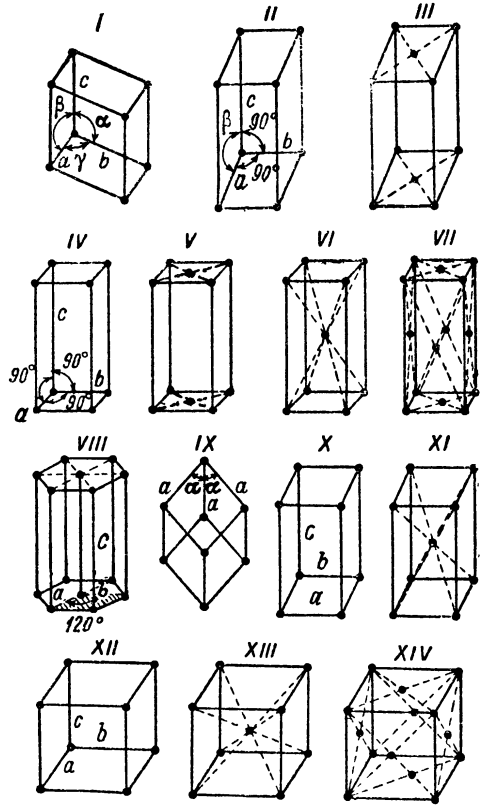


Рис. 15. Пространственные решетки:

I—простая триклинная; *II* —простая моноклинная; *III* — моноклинная с центрированными основаниями; *IV*— простая ромбическая; *V* — ромбическая с центрированными основаниями; *VI*— ромбическая объемноцентрированная; *VII* — ромбическая гранецентрированная; *VIII* — гексагональная; *IX* — ромбоэдрическая; *X*— простая тетрагональная; *XI* — тетрагональная объемноцентрированная; *XII*— простая кубическая; *XIII*— кубическая объемноцентрированная; *XIV*— кубическая гранецентрированная.

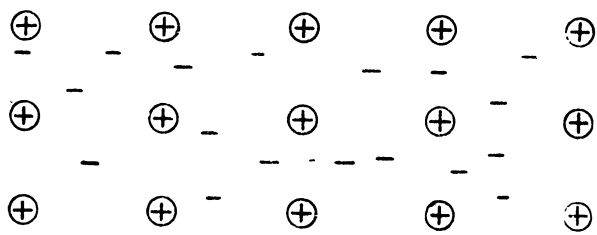


Рис. 16. Схема строения металлического проводника.

Таблица 7

Пространственные решетки и кристаллические системы

Кристаллическая система	Пространственная решетка	Соотношения между осевыми углами и осевыми единицами
Триклинная	1. Простая	$a \neq b \neq c$; $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$
Моноклинная . . .	2. Простая	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90°$ $\beta \neq 90°$
	3. Базоцентрированная	
Ромбическая	4. Простая	$a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
(орторомбическая)	5. Базоцентрированная	
	6. Объемноцентрированная	
	7. Гранецентрированная	
Гексагональная . .	8. Простая	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90°$ $\gamma = 120°$
	9. Ромбоэдрическая	
Тетрагональная . .	10. Простая	$a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
	11. Объемноцентрированная	
Кубическая	12. Простая	$a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90°$
	13. Объемноцентрированная	
	14. Гранецентрированная	

наблюдается между молекулами некоторых веществ (например парафина), имеющих низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности их кристаллической молекулярной решетки.

Дефекты в строении твердых тел

Нарушение правильности строения кристаллов и возможность изменения этих нарушений надо считать таким же неотъемлемым свойством реальных кристаллов, как и правильность их построения из атомов.

Представлению о порядке в мире атомов отвечает кристаллическая решетка со строго периодичным электростатическим полем.

Известно, что наиболее высоким порядком как ближнего (в пределах элементарной ячейки), так и дальнего (на больших расстояниях) расположения частиц отличаются индивидуальные химические соединения, когда они находятся в твердом кристаллическом состоянии. В случае

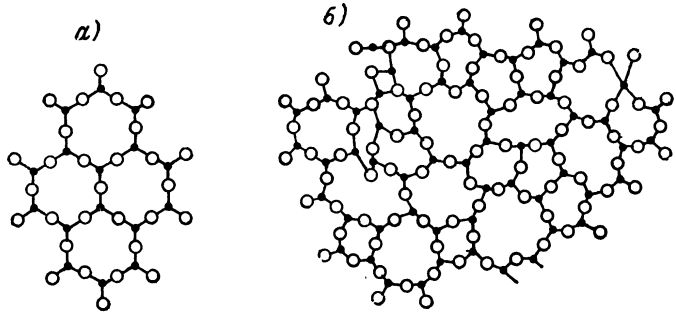


Рис. 17. Схематическое двухмерное изображение строения: *а* — решетки кристалла; *б* — стекла.

твердых растворов кристаллических веществ, стеклообразного и жидкого состояний можно говорить лишь о той или иной степени ближнего и дальнего порядка расположения частиц (рис. 17).

В радиоэлектронике находят широкое применение материалы с упорядоченным и неупорядоченным строением, и трудно отдать предпочтение тем или иным в отношении практической значимости.

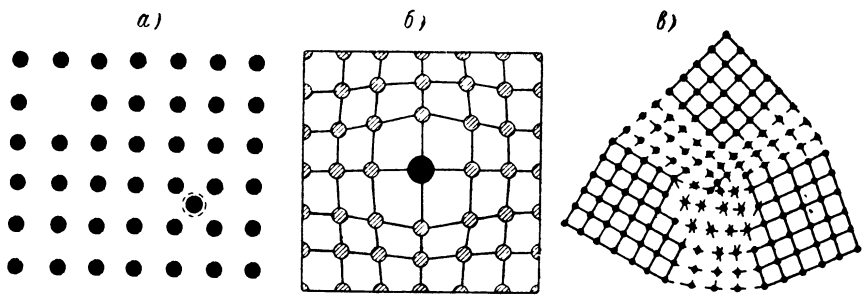


Рис. 18. Дефекты кристаллической решетки: *а* — пустой узел и собственный ион в междуузлии; *б* — посторонний атом в узле решетки; *в* — блочное строение кристалла.

Дефекты строения вещества, от которых зависят особые физические свойства материалов, используются для получения в технике самых различных материалов и приборов. Сюда относится люминесцентная техника, применяющая кристаллофосфоры для осветительных целей, экранов телевизионных трубок, оптических преобразователей, светящихся красок и др.

К дефектам твердого тела относятся любые нарушения периодичности электростатического поля кристаллической решетки: нарушение стехиометрического состава, наличие посторонних примесей, механические напряжения, кванты упругих колебаний — фононы, дополнительные кристаллографические плоскости — дислокации, трещины, поры и т. д.

По своей природе перечисленные дефекты могут быть или „тепловыми" или „биографическими".

На рис. 18 показаны некоторые из дефектов: пустой узел в решетке и собственный ион в междуузлии (*а*), посторонний атом в узле решетки (*б*), блочное строение кристалла (*в*).

Зонная теория твердых тел

Все тела, в зависимости от их электрических свойств при постоянном напряжении, могут быть также подразделены и отнесены к группе диэлектриков, проводников или полупроводников. Различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Исследование спектров излучения различных веществ в газообразном состоянии, когда атомы отстоят друг от друга на больших расстояниях, показывает, что для атомов каждого вещества характерны вполне определенные спектральные линии. Это говорит о наличии определенных энергетических состояний (уровней) для разных атомов.

Часть этих уровней заполнена электронами в нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других электроны могут находиться только тогда, когда атом подвергнется внешнему энергетическому воздействию, т. е. когда он возбужден. Стремясь прийти к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии в момент перехода электронов с возбужденных уровней на уровни, при которых его энергия минимальна. Сказанное можно характеризовать энергетической диаграммой атома, приведенной на рис. 19.

При конденсации газообразного вещества в жидкость, а затем образовании кристаллической решетки твердого тела все имеющиеся у данного типа атомов электронные уровни (как заполненные электронами, так и незаполненные) несколько смещаются вследствие действия соседних атомов друг на друга. Таким образом, из отдельных энергетических уровней уединенных атомов в твердом теле образуется целая полоса — зона энергетических уровней.

На рис. 20 показано различие в энергетических диаграммах (при температуре 0° К) металлических проводников, полупроводников и диэлектриков.

Диэлектриком будет такое тело, у которого запрещенная зона настолько велика, что электронной проводимости в обычных условиях не наблюдается.

Полупроводниками будут вещества с более узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена за счет внешних энергетических воздействий.

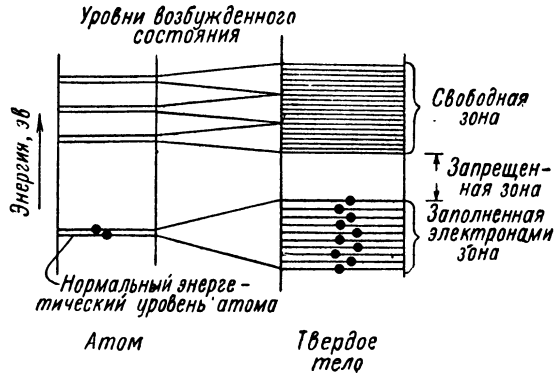


Рис. 19. Схема расположения энергетических уровней уединенного атома и неметаллического твердого тела.

У металлических проводников заполненная электронами зона вплотную прилегает или даже перекрывается зоной свободных энергетических уровней. Вследствие этого электроны в металле свободны, так как они могут переходить с уровней заполненной зоны

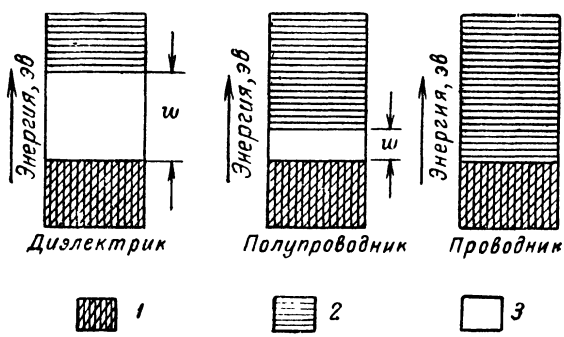


Рис. 20. Энергетическое отличие металлических проводников от полупроводников и диэлектриков с точки зрения зонной теории твердого тела.

1 — заполненная электронами зона; *2* — зона свободных энергетических уровней; *3* — запрещенная зона (w).

на незанятые уровни свободной зоны под влиянием слабых напряженностей приложенного к проводнику электрического поля.

При отсутствии в полупроводнике свободных электронов ($T^\circ K = 0$) приложенная к нему разность электрических потенциалов не вызовет

тока. Если извне будет подведена энергия, достаточная для переброса электрона через запрещенную зону, то, став свободным, электрон сможет перемещаться и под действием электрического поля, создавая электронную электропроводность полупроводника.

В заполненной зоне, откуда ушел электрон, образовалась „электронная дырка", а поэтому в полупроводнике начнется другое, „эстафетное" движение электронов, заполняющих образовавшуюся дырку, причем под воздействием электрического поля дырка будет двигаться в направлении поля как эквивалентный положительный заряд величиной $+1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *к*.

Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т. е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в веществе наступает равновесие, т. е. количество электронов, переходящих в свободную зону, становится равным количеству электронов, возвращающихся обратно в нормальное состояние.

С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением температуры до абсолютного нуля — убывает вплоть до нуля.

Значит вещество, представляющее собой диэлектрик при одних температурах, при других, более высоких, приобретает проводимость, т. е. наступает новое качественное изменение вещества.

Энергию, необходимую для перевода электрона в свободное состояние или для образования дырки, может доставить не только тепловое движение, но и другие источники энергии, например, поглощенная материалом энергия света, энергия потока электронов и ядерных частиц, энергия электрических и магнитных полей, механическая энергия и т. д., и т. п.

Увеличение же числа свободных электронов или дырок под воздействием какого-либо вида энергии способствует повышению электропроводности, увеличению тока, появлению электродвижущих сил.

Электрические свойства определяются условиями взаимодействия атомов вещества и не являются непременной особенностью данного атома. Например, углерод в виде алмаза является диэлектриком, а в виде графита он обладает большой проводимостью.

Примеси и связанные с ними дефекты кристаллической решетки также играют большую роль в электрических свойствах твердых тел.

Магнитные свойства веществ

В отношении магнитных характеристик различают диамагнитные, парамагнитные и ферромагнитные вещества.

Диамагнетиками являются вещества с относительной магнитной проницаемостью (§ 2) $\mu' < 1$, величина которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и ряд металлов: медь, серебро, цинк, золото, ртуть, а также висмут, галлий, сурьма, графит.

Парамагнетиками являются вещества с относительной магнитной проницаемостью $\mu' > 1$, также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. Из их числа можно назвать кислород, окись азота, соли редких земель, соли железа, кобальта и никеля, щелочные металлы, алюминий, платину.

Диамагнетики и парамагнетики имеют относительную магнитную проницаемость, близкую к единице.

Ферромагнетиками называют вещества, для которых $\mu' \gg 1$ и зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся: железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца, гадолиний.

Последовательность рассмотрения различных классов материалов, применяемых в радиоэлектронике

В дальнейшем изложении рассматриваются диэлектрики, проводники, полупроводники и магнитные материалы, применяемые в радиоэлектронике.

Такой порядок изучения материалов, принятый во всех ведущих технических вузах нашей страны, обусловлен рядом причин. Диэлектрики представляют собой наиболее обширный класс материалов как по номенклатуре, так и по разнообразию их свойств.

В курсе „Электрорадиоматериалы" изучается около 15 групп изоляционных материалов, насчитывающих свыше 100 представителей. Среди них техническое значение имеют как органические, так и неорганические вещества, в отличие от проводников, полупроводников и магнитных материалов, которые относятся к неорганическим материалам.

От правильного выбора электроизоляционного материала зависит надежность работы радиоэлектронной аппаратуры.

Численные значения характеристик электроизоляционных материалов часто оказываются лежащими на грани современных технических требований, предъявляемых к аппаратуре (по теплостойкости, механической прочности, отсутствию утечек тока или диэлектрических потерь).

Для оценки качества диэлектрика приходится внимательно изучать большое число его электрических, физико-механических и химических свойств в различных условиях окружающей среды.

Свойства многих диэлектриков существенным образом зависят, например, от температуры, влажности воздуха и т. д.

Поэтому в программе курса „Электрорадиоматериалы" диэлектрики выдвинуты на первое место.

Вслед за диэлектриками рассматриваются проводники, представляющие собой по электрическим свойствам противоположный класс материалов, немногочисленный по номенклатуре, с устойчивыми свойствами, обеспечивающими, как правило, запросы техники.

Предварительное изучение свойств диэлектриков и проводников электрического тока, как это сложилось и в историческом аспекте,

позволяет наилучшим образом понять особенности сравнительно недавно наметившегося класса полупроводниковых материалов и изготовляемых из них изделий.

Свойства полупроводниковых материалов в ряде случаев выявляются только у готовых изделий и определяются чистотой вещества и технологическим процессом его обработки.

Как уже подчеркивалось выше, резких границ между различными классами электрорадиоматериалов нет и в зависимости от внешних энергетических воздействий или частоты поля одно и то же вещество может быть отнесено к любому из них.

Курс заканчивается изучением класса ферромагнетиков, очень важного для современной техники, отличающегося спецификой магнитных характеристик относящихся к нему материалов.

Наряду с металлическими магнитными материалами в радиоэлектронике исключительно серьезное значение получили и все шире распространяются и завоевывают новые области применения магнитные полупроводники — ферриты.

РАЗДЕЛ I

ДИЭЛЕКТРИКИ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

§ 4. Поляризация диэлектриков

Ограниченное смещение связанных зарядов диэлектриков или ориентация их дипольных молекул под влиянием электрического поля носит название явления поляризации.

Степень поляризуемости диэлектриков оценивается увеличением емкости конденсатора при замене вакуума или воздуха между его пластинами данным материалом. Эта величина, как известно, называется относительной диэлектрической проницаемостью диэлектрика:

$$\varepsilon' = \frac{C_д}{C_0}, \qquad (34)$$

где C_0 — емкость конденсатора с вакуумом или воздухом;

$C_д$ — емкость конденсатора с данным диэлектриком.

Величина емкости конденсатора с диэлектриком и накопленный в нем электрический заряд обусловливаются суммой различных механизмов поляризации. Они могут наблюдаться у разных диэлектриков; несколько механизмов одновременно могут быть и у одного и того же материала. Эквивалентной схемой диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, служит ряд включенных параллельно к источнику напряжения U емкостей, как это показано на рис. 21. Емкость C_0 и заряд Q_0 соответствуют собственному полю электродов, если в пространстве между ними нет диэлектрика (вакуум). Емкость и заряд $C_э$, $Q_э$ характеризуют электронную поляризацию.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало и составляет около 10^{-15} *сек*. Поэтому электронную поляризацию условно называют мгновенной. Она проявляется при всех частотах, вплоть до $10^{14} \div 10^{16}$ *гц* (рис. 22).

Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерями энергии. Величина относительной диэлектрической проницаемости вещества с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света. Поляризуемость частиц при электронной поляризации не зависит от темпе-

ратуры. Однако величина ε' при электронной поляризации вещества уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема.

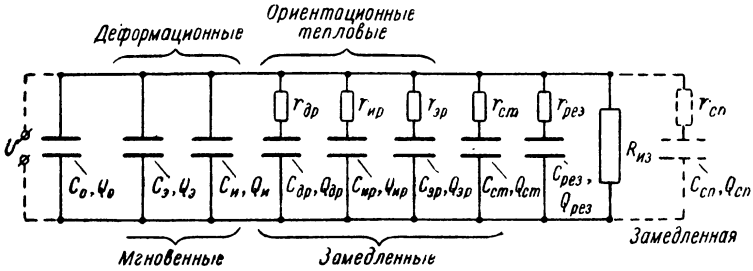


Рис. 21. Эквивалентная схема диэлектрика сложного состава с различными механизмами поляризации.

U — источник напряжения; C_0, Q_0 — емкость и заряд в вакууме; C и Q — с остальными индексами соответственно емкости и заряды от электронной, ионной, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, структурной, резонансной и спонтанной поляризациями; r — с соответствующими индексами сопротивления, эквивалентные потерям энергии при этих механизмах поляризации; $R_{из}$ — сопротивление изоляции сквозному току через диэлектрик.

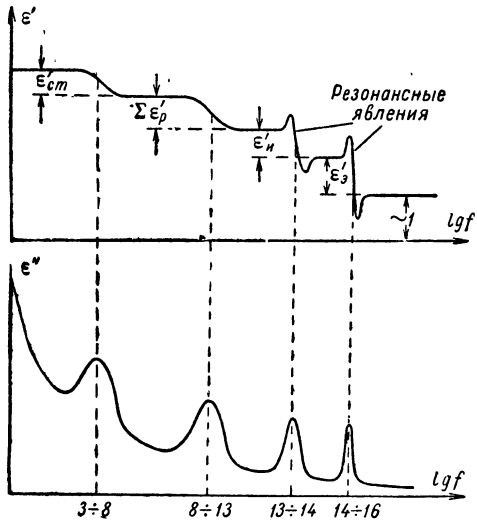


Рис. 22. Частотная зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости.

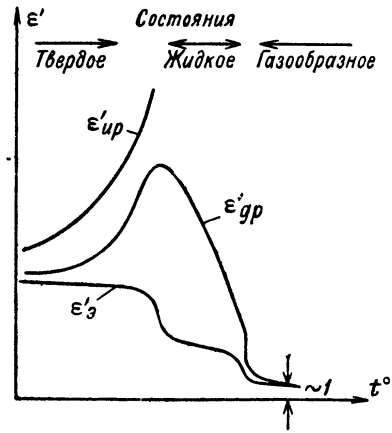


Рис. 23. Типичные кривые температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости при электронной ($\varepsilon'_э$), дипольно-релаксационной ($\varepsilon'_{др}$) и ионно-релаксационной ($\varepsilon'_{ир}$) поляризациях.

Кривая изменения ε' от температуры подобна кривой изменения плотности, причем наиболее резкие снижения наблюдаются при агрегатных переходах вещества из твердого состояния в жидкое и из жидкого в газообразное, как это видно из рис. 23.

Изменение ε' от температуры характеризуют температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости, общее определение которого соответствует выражению

$$\alpha_{\varepsilon'} = \frac{1}{\varepsilon'} \cdot \frac{d\varepsilon'}{dt} \; [град^{-1}]. \qquad (35)$$

Величину $\alpha_{\varepsilon'}$ для различных температур чаще всего находят методом графического дифференцирования кривой $\varepsilon' = F(t)$, как это показано на рис. 24. На этом рисунке показан участок кривой зависимости ε' диэлектрика с электронной поляризацией от температуры.

Для определения $\alpha_{\varepsilon'}$ при температуре t проводят касательную к кривой в интересующей нас точке и строят на ней произвольных размеров прямоугольный треугольник. При этом должен быть учтен масштаб отложенных по координатным осям величин. Тогда искомая величина равна:

$$\alpha_{\varepsilon',t} = \frac{1}{\varepsilon'_t} \cdot \frac{\Delta\varepsilon'}{\Delta t} \; [град^{-1}]. \qquad (36)$$

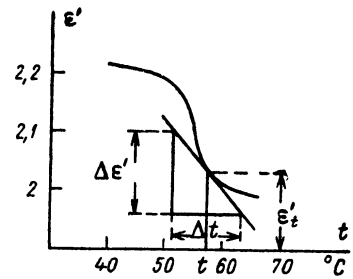


Рис. 24. Пояснение к определению $\alpha_{\varepsilon'}$ методом графического дифференцирования.

В данном примере знак температурного коэффициента диэлектрической проницаемости будет отрицательным. Этот метод применим для определения $\alpha_{\varepsilon'}$ при любом механизме поляризации и для зависимости $\varepsilon' = F(t)$ любой формы.

Ионная поляризация — $C_{и}$, $Q_{и}$ на схеме рис. 21 — характерна для твердых тел с ионным строением и обусловливается смещением упруго связанных ионов. Величина поляризации с повышением температуры возрастает в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ионами при тепловом расширении.

Время установления ионной поляризации — порядка 10^{-13} *сек* (рис. 22).

Дипольно-релаксационная поляризация — $C_{др}$, $Q_{др}$ — отличается от электронной и ионной тем, что она связана с тепловым движением частиц. Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.

Дипольно-релаксационная поляризация возможна, если молекулярные силы не мешают диполям ориентироваться вдоль поля. С увеличением температуры молекулярные силы ослабляются, что должно усиливать дипольно-релаксационную поляризацию; однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. В связи с этим величина дипольно-рела-

ксационной поляризации с увеличением температуры сначала возрастает, пока ослабление молекулярных сил сказывается сильнее, чем возрастание хаотического теплового движения. Затем, когда хаотическое движение становится интенсивнее, величина дипольно-релаксационной поляризации с ростом температуры начинает падать согласно рис. 23.

Поворот диполей в направлении поля требует преодоления некоторого сопротивления, а потому дипольно-релаксационная поляризация связана с потерями энергии на выделение тепла. Это отражено на схеме рис. 21 в виде последовательно включенного с емкостью активного сопротивления $r_{др}$. В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что при быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и дипольно-релаксационная поляризация уменьшается с увеличением частоты приложенного напряжения (рис. 22).

Дипольно-релаксационная поляризация свойственна полярным газам и жидкостям; этот вид поляризации может наблюдаться также и в твердых полярных органических веществах, но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже не поворотом самой молекулы, а поворотом имеющихся в ней полярных радикалов по отношению к молекуле. Такую поляризацию называют также дипольно-радикальной. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильных групп — ОН и кислорода.

В кристаллах с молекулярной решеткой и слабыми ван-дер-ваальсовыми связями возможна ориентация и более крупных частиц.

Дипольно-релаксационную поляризацию в твердых телах, проявляющуюся только при низких частотах, иногда называют структурной поляризацией.

Ионно-релаксационная поляризация — $C_{ир}$, $Q_{ир}$, $r_{ир}$ — наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионнных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов (рис. 14, *б*). В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля.

После снятия электрического поля ориентация ионов постепенно ослабевает. Математически такой процесс выражают формулой, отражающей зависимость тока от времени при разрядке:

$$I_{\tau_x} = I_0 e^{-\frac{\tau_x}{\tau_0}}, \qquad (37)$$

где τ_0 — постоянная времени (время релаксации*);

τ_x — время, прошедшее после снятия поля;

I_0 — начальный ток, отвечающий релаксационной поляризации.

---

* relaxatio — ослабление.

Таким образом, время релаксации — промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полем ионов или диполей после снятия поля уменьшится, вследствие наличия теплового движения, в 2,7 раза первоначального значения, т. е. система из неравновесного состояния подходит к равновесному.

Время релаксации, энергия активации и частота собственных колебаний релаксирующей частицы связаны следующим соотношением:

$$\tau_0 = \frac{1}{2f} e^{\frac{w}{kT}}, \qquad (38)$$

где f — частота собственных колебаний, *сек*$^{-1}$;

w — энергия активации, *эв*;

k — постоянная Больцмана ($8{,}63 \cdot 10^{-5}$ *эв/град*);

T — абсолютная температура, °К;

Температурная зависимость ионно-релаксационной поляризации показана на рис. 23. Кривая приведена только для твердых диэлектриков, так как, будучи расплавлены, ионные соединения становятся проводниками с электролитической проводимостью.

Следует отметить, что для большинства керамических материалов с ионно-релаксационной поляризацией максимума ε' в ее температурной зависимости до сих пор экспериментально не обнаружено. Это можно объяснить тем, что для многих видов радиокерамики количество ионов, участвующих в релаксационной поляризации, непрерывно возрастает с температурой. Кроме того, ввиду значительной энергии активации ионов, входящих в решетку радиокерамики, максимум ε' возможен лишь при высоких температурах, когда электропроводность материала резко возрастает.

Электронно-релаксационная поляризация — $C_{эр}$, $Q_{эр}$, $r_{эр}$ — возникает за счет ориентации возбужденных тепловой энергией избыточных „дефектных" электронов или „дырок".

Электронно-релаксационная поляризация характерна главным образом для диэлектриков с высоким показателем преломления, большим внутренним полем и электронной электропроводностью: двуокиси титана, загрязненной примесями Nb^{+5}, Ca^{+2}, Ba^{+2}; двуокиси титана с анионными вакансиями и примесью ионов Ti^{+3}; ряда соединений на основе окислов металлов переменной валентности — титана, ниобия, висмута.

Обращает на себя внимание исключительно высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может иметь место при электронно-релаксационной поляризации, а также наличие максимума в температурной зависимости ε' даже при отрицательных температурах. Диэлектрическая проницаемость титаносодержащей керамики с электронно-релаксационной поляризацией, в соответствии с теоретическими положениями, уменьшается с возрастанием частоты.

Резонансная поляризация — $C_{рез}$, $Q_{рез}$, $r_{рез}$ — наблюдается в диэлектриках при световых частотах. Она зависит от физико-химических особенностей вещества, может относиться к собственной

частоте электронов или ионов (при очень высоких частотах) или к характеристической частоте дефектных электронов (при более низких частотах). Резонансные изменения ε' показаны на рис. 22. Резонансная электронная поляризация связана с аномальной дисперсией света и еще недостаточно изучена. При аномальной дисперсии показатель преломления вещества для определенной частоты возрастает вследствие того, что за счет резонанса с собственными колебаниями частиц уменьшается фазовая скорость распространения колебаний, и материал для данной волны становится „вязким":

$$n_f = \frac{c}{v_f}, \tag{39}$$

где: n_f — показатель преломления для определенной частоты;

v_f — фазовая скорость распространения колебаний этой частоты в диэлектрике;

c — скорость волн всех частот в вакууме, равная $3 \cdot 10^8$ *м/сек.*

При резонансе сильно возрастает поглощение энергии волны, что видно по максимуму ε'' на том же рисунке. При дальнейшем увеличении частоты показатель преломления, а следовательно, и $\varepsilon' = n^2$ резко падают ввиду выключения данного механизма поляризации, после чего ε' снова несколько возрастает. Для рентгеновских лучей показатель преломления материалов — величина, меньшая единицы.

Структурная поляризация — $C_{ст}$, $Q_{ст}$, $r_{ст}$ — понимается как дополнительный механизм поляризации, проявляющейся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация проявляется при наиболее низких частотах (рис. 22) и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т. д.

При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. В граничных слоях слоистых материалов и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов, что создает эффект так называемой структурной высоковольтной поляризации.

Все емкости эквивалентной схемы рис. 21 шунтированы сопротивлением $R_{из}$, представляющим собой сопротивление диэлектрика току сквозной проводимости.

На рис. 21 пунктиром показаны также $C_{сп}$, $Q_{сп}$, $r_{сп}$, относящиеся к механизму самопроизвольной, или спонтанной, поляризации. Этот вид поляризации существует только у некоторых твердых диэлектриков ионной структуры, называемых сегнетоэлектриками.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация нелинейно зависит от величины напряженности электрического поля

и характеризуется явно выраженным максимумом при некоторой определенной температуре. Самопроизвольная поляризация сопровождается значительным рассеиванием энергии, т. е. выделением тепла.

В веществах со спонтанной поляризацией имеются отдельные области (домены), в которых заряженные частицы располагаются несимметрично еще в отсутствие внешнего поля (подробнее см. § 19). Однако при этом направление ориентации электрических моментов в разных доменах различно. Наложение внешнего поля способствует преимущественной ориентации электрических моментов доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации. В отличие от других видов поляризации, при некотором значении напряженности внешнего поля наступает насыщение, и дальнейшее усиление поля уже не вызывает возрастания интенсивности поляризации.

Особенности поляризации дают возможность подразделить все диэлектрики на несколько групп.

К первой группе можно отнести диэлектрики, обладающие в основном только электронной поляризацией, например нейтральные и слабополярные твердые вещества в кристаллическом и аморфном состояниях (парафин, сера, полистирол), а также нейтральные и слабополярные жидкости и газы (бензол, водород и др.).

Ко второй группе относятся диэлектрики, обладающие одновременно электронной и дипольно-релаксационной поляризациями. Сюда принадлежат дипольные органические жидкие, полужидкие и твердые вещества (масляно-канифольные компаунды, эпоксидные смолы; целлюлоза, хлорированные углеводороды и т. п.).

Третью группу составляют твердые неорганические диэлектрики с электронной, ионной, ионно- и электронно-релаксационными поляризациями. В этой группе целесообразно выделить две подгруппы материалов, ввиду существенного различия их электрических характеристик:

1) диэлектрики с электронной и ионной поляризациями;

2) диэлектрики с электронной, ионной и релаксационными поляризациями.

К первым преимущественно относятся кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов, например: кварц, слюда, каменная соль (рис. 14, *а*), корунд, рутил, перовскит.

Ко вторым принадлежат неорганические стекла, кристаллостекла (фарфор, микалекс) и кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой частиц в решетке.

Четвертую группу составляют сегнетоэлектрики, характеризующиеся спонтанной, электронной и ионной поляризациями: сегнетова соль, метатитанат бария и др.

Приведенная выше классификация диэлектриков позволяет, до известной степени, предопределять основные электрические свойства изоляционных материалов, как это показано далее.

Диэлектрическая проницаемость газов

Газообразные вещества характеризуются весьма малыми плотностями вследствие больших расстояний между молекулами. Благодаря этому поляризация газов незначительна и диэлектрическая проницаемость всех газов близка к единице. Поляризация газа может быть чисто электронной или дипольной, если молекулы газа полярны, однако и в этом случае основное значение имеет электронная поляризация.

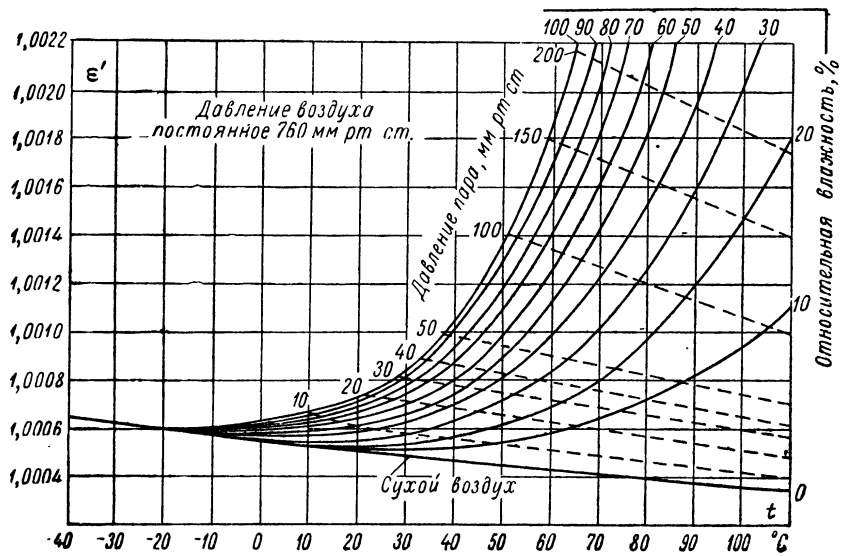


Рис. 25. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости воздуха при различной влажности от температуры и давления водяных паров.

В табл. 8 приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых газов с указанием радиуса молекулы и коэффициента преломления света n.

Из данных табл. 8 видно, что диэлектрическая проницаемость газа тем меньше, чем больше радиус молекулы.

Таблица 8

Диэлектрическая проницаемость газов

Наименование газа	Радиус молекулы, *см*	Коэффициент преломления n	n^2	ε' при t = 20° С и p = 760 *мм* рт. ст.
Гелий	$1{,}12 \cdot 10^{-8}$	1,000035	1,000070	1,000072
Водород	$1{,}35 \cdot 10^{-8}$	1,00014	1,00028	1,00027
Кислород . . .	$1{,}82 \cdot 10^{-8}$	1,00027	1,00054	1,00053
Аргон	$1{,}83 \cdot 10^{-8}$	1,000275	1,00055	1,00056
Азот	$1{,}91 \cdot 10^{-8}$	1,00030	1,00060	1,00060
Углекислота .	$2{,}30 \cdot 10^{-8}$	1,00050	1,00100	1,00096
Этилен	$2{,}78 \cdot 10^{-8}$	1,00065	1,00130	1,00138

Зависимость диэлектрической проницаемости газа от температуры и давления определяется числом молекул в единице объема газа, которое пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре.

Основной газовой средой, с которой приходится иметь дело в радиотехнике, является воздух. Воздух при не очень высоких значениях напряженности электрического поля представляет собой очень хороший диэлектрик. Диэлектрическая проницаемость воздуха при различной влажности в зависимости от температуры и давления водяных паров приведена на рис. 25.

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сухого воздуха может быть определен по выражению:

$$\alpha_{\varepsilon'} = -\frac{\varepsilon' - 1}{T}. \qquad (40)$$

При 20° С эта величина — порядка $-2 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$, что не трудно проверить, пользуясь данными рис. 25.

Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики могут быть построены из нейтральных (неполярных) молекул или из дипольных (полярных) молекул.

Величина диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей невелика, близка к значению квадрата показателя преломления света $\varepsilon' \approx n^2$ и обычно не превышает 2,5.

Зависимость диэлектрической проницаемости нейтральной жидкости от температуры связана с уменьшением числа молекул в единице объема, т. е. с уменьшением плотности. $\alpha_{\varepsilon'}$ по абсолютному значению близок к температурному коэффициенту объемного расширения жидкости α_V. Следует помнить, что $\alpha_{\varepsilon'}$ и α_V отличаются знаком.

В табл. 9 приведены значения диэлектрической проницаемости и $\alpha_{\varepsilon'}$ для некоторых нейтральных и слабополярных жидкостей.

Поляризация жидкостей, содержащих дипольные молекулы, определяется одновременно электронной и дипольно-релаксационной составляющими.

Таблица 9

Диэлектрическая проницаемость нейтральных и слабополярных жидкостей

Наименование жидкости	n^2	ε'	$\alpha_{\varepsilon'}$, *град*$^{-1}$	α_V, *град*$^{-1}$
Бензол	2,25	2,218	$-0{,}93 \cdot 10^{-3}$	$1{,}24 \cdot 10^{-3}$
Толуол	2,25	2,294	$-1{,}16 \cdot 10^{-3}$	$1{,}10 \cdot 10^{-3}$
Четыреххлористый углерод	2,135	2,163	$-0{,}91 \cdot 10^{-3}$	$1{,}227 \cdot 10^{-3}$

Такие жидкости обладают тем большей диэлектрической проницаемостью, чем больше величина электрического момента диполей и чем больше число молекул в единице объема.

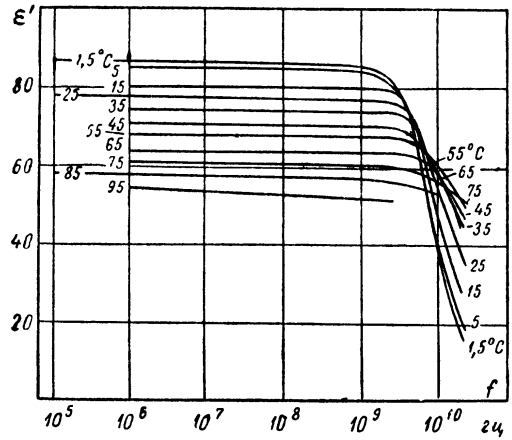


Рис. 26. Частотные характеристики ε' воды при различной температуре.

Сильнополярные жидкости, характеризующиеся очень высоким значением диэлектрической проницаемости, например вода, этиловый спирт, не могут найти практического применения в качестве диэлектриков вследствие их большой электропроводности.

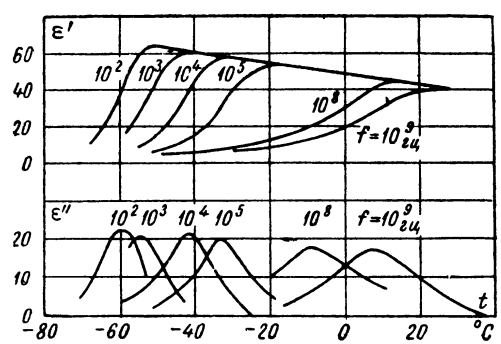


Рис. 27. Составляющие комплексной диэлектрической проницаемости для глицерина при разных частотах и различной температуре.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости в случае дипольных жидкостей имеет более сложный характер, чем в случае нейтральных, и была показана на рис. 23.

Значительное влияние на величину ε' дипольной жидкости оказывает частота. На рис. 26 представлена зависимость ε' от частоты

для воды. Пока частота настолько мала, что диполи успевают следовать за полем, ε' велика и близка к значению, определенному при постоянном напряжении. Когда же частота становится настолько большой, что молекулы уже не успевают следовать за изменением поля, диэлектрическая проницаемость уменьшается и ее значение приближается к величине, обусловленной электронной поляризацией.

Влияние частоты на характер зависимости диэлектрической проницаемости от температуры для полярной жидкости показано на рис. 27. Как видно из рисунка, с увеличением частоты максимум в температурной зависимости ε' смещается в область более высоких температур. Это объясняется тем, что максимум наблюдается, когда время релаксации становится одного порядка с полупериодом действия поля. Если увеличить частоту, то это совпадение сможет наступить при более высокой температуре.

Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость твердых тел может принимать самые различные числовые значения в соответствии с разнообразием структурных особенностей твердого диэлектрика. В твердых телах возможны все виды поляризации, указанные на рис. 21.

Наименьшее значение диэлектрической проницаемости имеют твердые диэлектрики, построенные из нейтральных молекул и обладающие только электронной поляризацией.

В табл. 10 приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых нейтральных твердых диэлектриков (при $t = 20°$ С).

Таблица 10

Диэлектрическая проницаемость нейтральных твердых диэлектриков

Наименование материала	n	n^2	ε'
Парафин	1,43	2,06	1,9—2,2
Полистирол	1,55	2,40	2,4—2,6
Сера	1,92	3,69	3,6—4,0
Алмаз	2,40	5,76	5,6—5,8

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц, обладают электронной и ионной поляризациями и имеют величину диэлектрической проницаемости, лежащую в широких пределах. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости ионных кристаллов в большинстве случаев имеет положительное значение вследствие того, что при повышении температуры наблюдается не только уменьшение плотности вещества, но и возрастание поляризуемости ионов, причем влияние этого фактора

сказывается на величине ε' сильнее, чем изменение плотности. Исключением являются кристаллы, содержащие ионы титана — рутил (TiO_2), и некоторые титанаты, имеющие отрицательный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости. Отрицательный $\alpha_{\varepsilon'}$ этих кристаллов объясняется преобладающей в них электронной поляризацией, усиленной под влиянием добавочного внутреннего поля при ионном смещении, которое ослабляется при повышении температуры.

В табл. 11 приведены значения диэлектрической проницаемости и температурного коэффициента диэлектрической проницаемости для некоторых ионных кристаллов (при $t = 20°$ С).

Таблица 11

Значения ε' и $\alpha_{\varepsilon'}$ ионных кристаллов

Наименование кристалла		ε'	$\alpha_{\varepsilon'}$, $град^{-1}$
Положительный $\alpha_{\varepsilon'}$	Каменная соль (NaCl)	6	$+ 150 \cdot 10^{-6}$
	Корунд (Al_2O_3)	10	$+ 100 \cdot 10^{-6}$
Отрицательный $\alpha_{\varepsilon'}$	Рутил (TiO_2)	110	$- 750 \cdot 10^{-6}$
	Титанат кальция ($CaO \cdot TiO_2$) .	150	$- 1500 \cdot 10^{-6}$

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с неплотной упаковкой частиц, в которых наблюдается, помимо электронной и ионной поляризаций, также и релаксационная поляризация, характеризуются в большинстве случаев сравнительно невысоким значением диэлектрической проницаемости и большим положительным температурным коэффициентом диэлектрической проницаемости. Примером может служить минерал кордиерит, для которого $\varepsilon' = 8$ и $\alpha_{\varepsilon'} = + 250 \cdot 10^{-6}$ $град^{-1}$.

Для неорганических стекол, являющихся аморфными диэлектриками, диэлектрическая проницаемость лежит в сравнительно узких пределах — примерно от 4 до 20, причем $\alpha_{\varepsilon'}$ стекол всегда положителен.

В случае наличия в стекле легко подвижных щелочных ионов $\alpha_{\varepsilon'}$ увеличивается и достигает больших значений: $+ (500 \div 1000) \cdot 10^{-6} \cdot град^{-1}$. Можно получить для стекла и отрицательный $\alpha_{\varepsilon'}$, если ввести в его состав в виде механической примеси кристаллические компоненты с отрицательным $\alpha_{\varepsilon'}$, например рутил.

К материалам с заметно выраженными ионно-релаксационной и электронно-релаксационной поляризациями, относятся, например, изоляторный фарфор, щелочные стекла, а также стеатит и титаносодержащая керамика. Температурные зависимости ε' в области повышенных температур для некоторых из них приведены на рис. 28. С повышением частоты и уменьшением влияния релаксационной поляризации $\alpha_{\varepsilon'}$ этих веществ заметно понижается.

Как видно из рис. 28, *б*, при наличии электронно-релаксационной поляризации (в случае титаносодержащей керамики) $\alpha_{\varepsilon'}$ при высоких температурах меняет знак.

Полярные органические диэлектрики обнаруживают, как указывалось ранее, в твердом состоянии дипольно-релаксационную поляризацию. Замедленная дипольно-релаксационная поляризация наблюдается также у льда.

Диэлектрическая проницаемость указанных выше материалов в большой степени зависит от температуры и от частоты приложенного

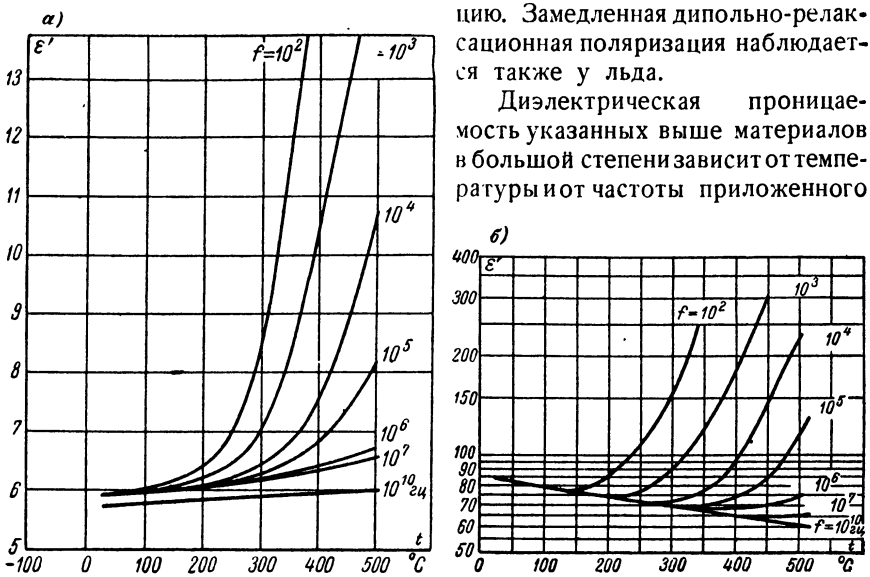


Рис. 28. Температурная зависимость ε' стеатитовой (*а*) и титаносодержащей (*б*) керамики при различных частотах.

напряжения, подчиняясь тем же закономерностям, какие наблюдаются для дипольных жидкостей. На рис. 50 представлена зависимость ε' от температуры и частоты для льда. При низких частотах лед, как вода, имеет $\varepsilon' \approx 80$, однако с понижением температуры и повышением частоты ε' быстро падает и доходит до 2,8 — 3.

В табл. 12 даны значения диэлектрической проницаемости некоторых твердых тел, рассматриваемых выше.

Таблица 12

Значения ε' неорганических стекол и дипольных твердых диэлектриков

Наименование неорганического стекла	ε'	Наименование дипольного твердого диэлектрика	ε'
Плавленый кварц	4,5	Органическое стекло	3,5
Щелочное стекло	6,5	Феноло-формальдегидная смола	4,5
Бариевое стекло	10	Целлюлоза	6,5

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой смесь компонентов с различными диэлектрическими проницаемостями, может быть в первом приближении (при не слишком большом различии ε' компонентов) определена на основании уравнения Лихтенекера, которое в общем случае имеет в виду расчет самых различных свойств (например, теплопроводности, показателя преломления и др.):

$$\varepsilon'^{x} = \theta_1 \varepsilon_1'^{x} + \theta_2 \varepsilon_2'^{x}; \tag{41}$$

здесь ε', ε_1', ε_2' — соответственно диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов;

θ_1 и θ_2 — объемные концентрации компонентов, удовлетворяющие соотношению

$$\theta_1 + \theta_2 = 1;$$

x — константа, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от $+1$ до -1.

При параллельном включении компонентов $x = +1$ и выражение (41) имеет вид:

$$\varepsilon' = \theta_1 \varepsilon_1' + \theta_2 \varepsilon_2' . \tag{42}$$

При последовательном включении компонентов, когда $x = -1$, имеем:

$$\frac{1}{\varepsilon'} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_1'} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_2'} . \tag{43}$$

Наконец, когда оба компонента распределены хаотически (что как раз имеет место в ряде интересующих нас технических диэлектриков, например в керамике), уравнение Лихтенекера дает:

$$\ln \varepsilon' = \theta_1 \ln \varepsilon_1' + \theta_2 \ln \varepsilon_2'. \tag{44}$$

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика определяется на основании дифференцирования предыдущего уравнения по температуре, что дает:

$$\left.\begin{aligned} \frac{1}{\varepsilon'} \cdot \frac{d\varepsilon'}{dt} &= \frac{\theta_1}{\varepsilon_1'} \cdot \frac{d\varepsilon_1'}{dt} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_2'} \cdot \frac{d\varepsilon_2'}{dt}; \\ \alpha_{\varepsilon'} &= \theta_1 \alpha_{\varepsilon_1'} + \theta_2 \alpha_{\varepsilon_2'} . \end{aligned}\right\} \tag{45}$$

При значительном различии диэлектрических проницаемостей компонентов смесей удобно пользоваться для расчетов диэлектрической проницаемости формулой Оделевского:

$$\varepsilon' = B + \sqrt{B^2 + \frac{\varepsilon_1' \varepsilon_2'}{2}}, \tag{46}$$

где:

$$B = \frac{(3\theta_1 - 1)\,\varepsilon_1' + (3\theta_2 - 1)\,\varepsilon_2'}{4}, \qquad (47)$$

причем θ_1 и θ_2 — объемные концентрации компонентов, которые определяются как отношение весовых концентраций к плотности вещества:

$$\theta_1 = \frac{\nu_1 M_1 \rho_2}{\rho_1 \nu_2 M_2 + \rho_2 \nu_1 M_1}; \quad \theta_2 = \frac{\nu_2 M_2 \rho_1}{\rho_1 \nu_2 M_2 + \rho_2 \nu_1 M_1}; \qquad (48)$$

здесь ν_1, ν_2 — молярные концентрации компонентов;
ρ — плотность смеси;
M_1, M_2 — молекулярные веса;
ρ_1, ρ_2 — плотности компонентов.

§ 5. Токи смещения и электропроводность диэлектриков

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления и получения равновесного состояния протекают во времени, представляя поляризационные токи, или токи смещения в диэлектриках. Токи смещения упруго связанных зарядов при электронной и ионной поляризациях столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют абсорбционными токами.

При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они имеют место в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по величине токов сквозной проводимости или токов утечки. Таким образом, полная плотность тока в диэлектрике представляет собой сумму плотностей токов проводимости и смещения:

$$i = i_{пр} + i_{см}. \qquad (49)$$

Ток смещения определяется скоростью изменения вектора смещения (индукции) D

$$i_{см} = \frac{\partial D}{\partial \tau}, \qquad (50)$$

включающего в себя мгновенные (электронное, ионное) и замедленные смещения зарядов. Изложенное поясняет рис. 29, на котором показано установление во времени, при мгновенном приложении электрического поля, величины емкости конденсатора с данным диэлектриком, характеризующимся наличием мгновенных и замедленных (релаксационных) механизмов поляризации; там же приведены составляющие полной плотности тока через диэлектрик.

Как видно из рисунка, после того, как процессы поляризации завершатся, через диэлектрик протекает только ток сквозной проводимости.

Поляризационные токи необходимо принимать во внимание при измерениях электропроводности диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только сквозной ток, но и сопровождающий его обратимый ток — ток абсорбции, вследствие чего может создаться неправильное представление о большой сквозной электропроводности.

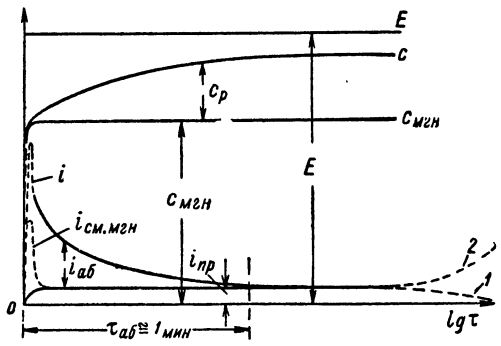


Рис. 29. Емкость и плотность тока в конденсаторе с диэлектриком, обладающим различными механизмами поляризации и сквозной электропроводностью, в зависимости от времени при мгновенном приложении электрического поля.

Электропроводность диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, сопровождающемуся выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная электропроводность определяется не только сквозным током, но и активными составляющими поляризационных токов.

Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный (ионный) характер.

Истинное сопротивление диэлектрика при постоянном напряжении $R_{из}$, определяющее величину сквозного тока, может быть вычислено по формуле

$$R_{из} = \frac{U}{I - \Sigma I_п}, \qquad (51)$$

где I — наблюдаемый ток;

U — приложенное напряжение;

$\Sigma I_п = I_{аб}$ — сумма токов, вызванных замедленными видами поляризации.

Поскольку определение поляризационных токов даже замедленных типов поляризации представляет трудности, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на величину тока, измеренную через одну минуту после включения напряжения (независимо от величины $\Sigma I_п = I_{аб}$). При этом получают R_1, которое может быть ниже истинного значения $R_{из}$.

Для твердых изолирующих материалов необходимо различать объемную электропроводность и поверхностную электропроводность.

Для сравнительной оценки различных материалов в отношении их объемной и поверхностной электропроводности пользуются зна-

чениями удельного объемного сопротивления ρ и удельного поверхностного сопротивления ρ_s.

В практике принято, что ρ численно равно сопротивлению куба с ребром в 1 *см*, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит через две противоположные грани этого куба; ρ выражается в омосантиметрах (*ом·см*).

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объемное сопротивление рассчитывается по формуле

$$\rho = R\frac{S}{h} \quad [ом \cdot см], \tag{52}$$

где R — объемное сопротивление образца, *ом*;

S — площадь электрода, $см^2$;

h — толщина образца, *см*.

Удельное поверхностное сопротивление численно равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого квадрата; ρ_s измеряется в омах. Удельное поверхностное сопротивление ρ_s рассчитывается по формуле

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l} \quad [ом], \tag{53}$$

где R_s — поверхностное сопротивление образца материала между параллельно поставленными электродами шириной d, отстоящими друг от друга на расстоянии l (рис. 30).

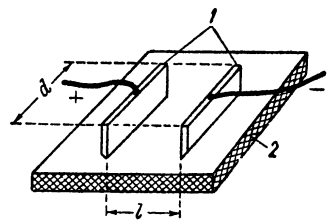


Рис. 30. Эскиз размещения электродов (*1*) на поверхности образца из электроизоляционного материала (*2*) при измерении ρ_s.

По удельному объемному сопротивлению может быть определена удельная объемная проводимость согласно выражению $\gamma = \frac{1}{\rho}$ $[ом^{-1} \cdot см^{-1}]$ и, соответственно, удельная поверхностная проводимость $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$ $[ом^{-1}]$.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению $R_{из}$, складывается из объемной и поверхностной проводимостей.

Электропроводность изолирующих материалов обусловливается состоянием вещества: газообразным, жидким или твердым, а также зависит от влажности и температуры окружающей среды. Некоторое влияние на электропроводность диэлектриков оказывает также напряженность поля в образце, при которой проводится измерение.

При длительной работе под напряжением ток проводимости через твердые и жидкие диэлектрики с течением времени может умень-

шаться или увеличиваться, как это показано на рис. 29. Уменьшение тока проводимости со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца (кривая *1*). Увеличение тока со временем (кривая *2*) говорит об участии в нем зарядов, являющихся структурными элементами самого материала, и протекающем в диэлектрике необратимом процессе старения под напряжением, способном постепенно привести к разрушению — пробою диэлектрика.

Электропроводность газов

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой электропроводностью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами.

Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие (сильный нагрев газа). Электропроводность газа, обусловленная действием таких внешних ионизаторов, называется несамостоятельной электропроводностью газа.

С другой стороны, особенно в разреженных газах, возможно создание электропроводности за счет ионов, образующихся в результате соударений заряженных частиц с молекулами газа.

Ударная ионизация возникает в газе в тех случаях, когда кинетическая энергия заряженных частиц, приобретаемая под действием электрического поля, достигает достаточно больших значений.

Электропроводность газа, обусловленная ударной ионизацией, носит название самостоятельной.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной электропроводности не обнаруживается. При ионизации газа, обусловленной внешними факторами, происходит расщепление молекул на положительные и отрицательные ионы. Одновременно часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образует нейтральные молекулы. Этот процесс называется рекомбинацией.

Наличие рекомбинации препятствует безграничному росту числа ионов в газе и объясняет установление определенной концентрации ионов спустя короткое время после начала действия внешнего ионизатора.

Предположим, что в данный момент в единице объема газа имеется n_0 положительных ионов и такое же число отрицательных. Тогда число ионов n_1, рекомбинирующих в единице объема в единицу времени, будет:

$$n_1 = \nu n_0^2, \qquad (54)$$

где ν — коэффициент рекомбинации; для воздуха $\nu = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ *см*$^3 \cdot$ *сек*$^{-1}$.

Условие равновесия заключается в равенстве числа вновь образующихся ионов n_2 числу рекомбинирующих ионов n_1, откуда

$$n_2 = n_1 = \nu n_0^2. \tag{55}$$

Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение, причем расстояние между электродами равно 1 *см*. Ионы под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникнет ток. Часть ионов будет нейтрализоваться на электродах, часть исчезнет за счет рекомбинации.

Исходя из этого, можно написать равенство

$$n_2 = \nu n_0^2 + \frac{i}{q}, \tag{56}$$

где i — плотность тока;

q — заряд иона.

Рассмотрим два предельных случая. В первом случае плотность тока i настолько мала, что $\frac{i}{q} \ll \nu n_0^2$, т. е. числом ионов, выделяющихся на электродах, можно пренебречь.

Тогда $n_2 = \nu n_0^2$, и плотность тока

$$i = n_0 q (v_+ + v_-) = n_0 q (v_{1+} + v_{1-}) E, \tag{57}$$

где: v_+, v_- — значения скоростей положительных и отрицательных ионов при приложенном напряжении;

v_{1+}, v_{1-} — значения подвижностей соответствующих ионов, численно равные скоростям ионов при напряженности поля, равной единице;

E — напряженность электрического поля.

Плотность тока при слабых напряженностях поля, как это видно из выражения (57), пропорциональна напряженности поля, т. е. имеет место закон Ома.

Во втором случае, если плотность тока велика и убыль ионов связана только с их нейтрализацией на электродах, а рекомбинация мала, то можно пренебречь первым членом уравнения (56). Тогда

$$n_2 = \frac{i}{q}. \tag{58}$$

Из выражения (58) видно, что плотность тока в этом случае не зависит от напряжения. Такой ток называется **током насыщения**.

На рис. 31 показан характер зависимости тока от напряжения. Начальный участок кривой до напряжения $U_н$ соответствует области выполнения закона Ома, когда число положительных и отрицательных ионов n_0 в данном объеме газа можно считать постоянным. Ток пропорционален напряжению на газовом промежутке; плотность тока пропорциональна напряженности поля.

По мере возрастания величины приложенного напряжения ионы уносятся к электродам, не успевая рекомбинироваться, и при некотором напряжении все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут разряжаться на электродах. Очевидно, что дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока, что соответствует горизонтальному участку кривой рис. 31 (ток насыщения при напряжениях от $U_н$ до $U_{кр}$). Ток насыщения достигается для воздуха в нормальных условиях и расстоянии между электродами 1 *см* при напряженностях поля около 0,006 *в/см*.

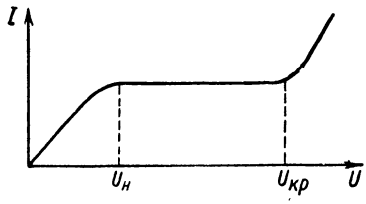


Рис. 31. Зависимость тока от напряжения для газа.

Реальное значение величины плотности тока насыщения в воздухе весьма мало и составляет величину порядка 10^{-19} *а/см*^{2}. Поэтому воздух можно рассматривать как весьма совершенный диэлектрик до тех пор, пока не создадутся условия для появления ударной ионизации.

Ток при увеличении напряжения остается постоянным лишь до тех пор, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При возникновении ударной ионизации появляется самостоятельная проводимость (выше $U_{кр}$ на рис. 31), и ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения.

Электропроводность жидкостей

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В нейтральных жидкостях электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей, в том числе влаги; в полярных жидкостях электропроводность определяется не только примесями, но иногда и диссоциацией молекул самой жидкости.

Ток в жидкости может быть обусловлен как передвижением ионов, так и перемещением относительно крупных заряженных коллоидных частиц.

Невозможность полного удаления способных к диссоциации примесей из жидкого диэлектрика затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малыми значениями удельной электропроводности.

Полярные жидкости всегда имеют повышенную электропроводность по сравнению с неполярными, причем возрастание диэлектрической проницаемости приводит к росту электропроводности. Сильнополярные жидкости отличаются настолько высокой электропроводностью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной проводимостью.

Очистка жидких диэлектриков от содержащихся в них примесей дает заметное повышение их удельного электросопротивления. При длитель-

ном пропускании электрического тока через нейтральный жидкий диэлектрик также можно наблюдать возрастание электросопротивления за счет переноса свободных ионов к электродам (электрическая очистка, рис. 29).

Электропроводность любой жидкости сильно зависит от температуры. С увеличением температуры возрастает подвижность ионов, в связи с уменьшением вязкости, и может увеличиваться степень тепловой диссоциации. Оба эти фактора увеличивают удельную электропроводность:

$$\gamma = Ae^{-\frac{a}{T_0}}, \tag{59}$$

где A и a — постоянные, характеризующие материал. В широком интервале температур зависимость удельной электропроводности жидких диэлектриков от температуры может быть довольно точно выражена следующей формулой:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t}, \tag{60}$$

где γ_0 и α — постоянные величины для данной жидкости;
t — температура, °С.

При очень больших напряженностях электрического поля (порядка $10^4 - 10^5$ *в/см*), как показывает опыт, электропроводность жидкостей не следует закону Ома, что объясняется увеличением числа движущихся ионов под влиянием поля.

Электропроводность твердых диэлектриков

Электропроводность твердых тел обусловливается как передвижением ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а у некоторых материалов может быть вызвана наличием свободных электронов.

Электронная электропроводность наиболее заметна при сильных электрических полях.

Вид электропроводности устанавливают экспериментально, используя закон Фарадея. Ионная электропроводность сопровождается переносом вещества на электроды. При электронной электропроводности это явление не наблюдается.

В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примесей могут частично удаляться, выделяясь на электродах; последнее приводит к уменьшению электропроводности с течением времени и к соответствующему спаданию тока (рис. 29).

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов, вырываемых из решетки под влиянием флуктуаций теплового движения. При низких температурах передвигаются слабо закрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах движутся основные ионы кристаллической решетки.

В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность связана только с наличием примесей.

В каждом отдельном случае вопрос о механизме электропроводности решается на основании данных об энергии активации носителя тока. Известно, например, что для каменной соли энергия активации ионов натрия при нормальной температуре составляет около 0,85 *эв*. Энергия активации ионов хлора в три раза больше, а энергия активации электронов равна 6 *эв*, тогда как средняя энергия теплового движения при комнатной температуре составляет всего лишь 0,025 *эв*.

Удельная электропроводность при температуре T выражается следующей простой зависимостью:

$$\gamma = qn_{0,T}v_{1,T} \tag{61}$$

где q — заряд носителя в кулонах;

$n_{0,T}$ — число носителей в единице объема (1 $см^3$);

$v_{1,T}$ — подвижность, $см^2/сек \cdot в$;

γ — удельная электропроводность, $(ом \cdot см)^{-1}$.

При этом предполагается, что концентрация носителей и подвижность v_1 не зависят от напряженности электрического поля, т. е. скорость их перемещения v пропорциональна напряженности поля: $v = v_1 E$ $[см/сек]$.

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов; в двуокиси титана, например, подвижность электронов составляет около 1 $см^2/сек \cdot в$, тогда как подвижность ионов в алюмосиликатной керамике всего лишь 10^{-9}—10^{-12} $см^2/сек \cdot в$. В связи с указанным, в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрация электронов в 10^9—10^{12} раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью, при одинаковом заряде носителей и одинаковом значении электропроводности.

Как было отмечено ранее, при ионной электропроводности число диссоциированных ионов находится в экспоненциальной зависимости от температуры:

$$n_{0,T} = n_0 e^{-\frac{w_д}{kT}}, \tag{62}$$

где n_0 — общее число ионов в 1 $см^3$;

$w_д$ — энергия диссоциации;

kT — тепловая энергия.

Подвижность иона также выражается экспоненциальной формулой зависимости от температуры:

$$v_{1,T} = v_{1,m} e^{-\frac{w_п}{kT}}, \tag{63}$$

где $v_{1,m}$ — предельная подвижность иона;

$w_п$ — энергия перемещения иона, определяющая переход его из одного неравновесного положения в другое.

Подставляя $n_{0,T}$ и $v_{1,T}$ в формулу для электропроводности (61) и объединяя постоянные n_0, q и v_{1m} одним коэффициентом A, имеем:

$$\gamma = Ae^{-\frac{b}{T}}, \tag{64}$$

где

$$b = \frac{w_д + w_n}{k} \tag{65}$$

Формула показывает, что чем больше значения энергии диссоциации и перемещения, тем резче изменяется электропроводность с температурой.

Численное значение коэффициента b находится из экспериментально полученной зависимости электропроводности от температуры по формуле

$$b = \frac{\Delta \ln \gamma}{\Delta \frac{1}{T}}. \tag{66}$$

Ввиду того, что обычно $w_д \gg w_n$, величина электропроводности при изменении температуры определяется главным образом изменением концентрации носителей.

Формула (64) аналогична формуле (59), характеризующей электропроводность жидкостей, однако коэффициент a в формуле (59) отражает подвижность ионов, зависящую от вязкости, в то время как в случае твердого тела коэффициент b в формуле (64) учитывает также увеличение числа свободных ионов при возрастании температуры. Величина b для твердых веществ лежит в пределах 10 000—22 000 *град*.

В случае, если в диэлектрике ток обусловлен передвижением разнородных ионов, выражение (64) имеет вид:

$$\gamma = \sum A_i e^{-\frac{w_i}{kT}}. \tag{67}$$

В связи с этим логарифмическая зависимость электропроводности от температуры имеет изломы, как это видно из рис. 32.

При низких температурах обычно измеряют не собственную электропроводность вещества, а обусловленную примесями. В некоторых случаях излом в температурной зависимости электропроводности объясняется тем, что ионы основного вещества имеют различные энергии диссоциации.

Заменяя γ через $\frac{1}{\rho}$, получают выражение для зависимости удельного объемного электросопротивления от температуры:

$$\rho = Be^{\frac{b}{T}}, \tag{68}$$

где b, B — постоянные, характерные для данного материала.

Для практических целей, при рассмотрении зависимости γ и ρ от температуры, можно использовать приближенные формулы, в которых

вместо абсолютной температуры T введена температура по стоградусной шкале:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t}, \tag{69}$$

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha t}, \tag{70}$$

где γ_0 — удельная объемная электропроводность при $t = 0°$ С;
ρ_0 — удельное объемное электросопротивление при $t = 0°$ С;
α — температурный коэффициент.

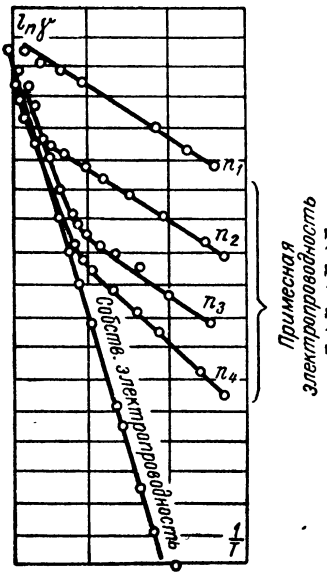


Рис. 32. Собственная и примесная электропроводности диэлектрика при различном содержании примеси: n — концентрация примеси.

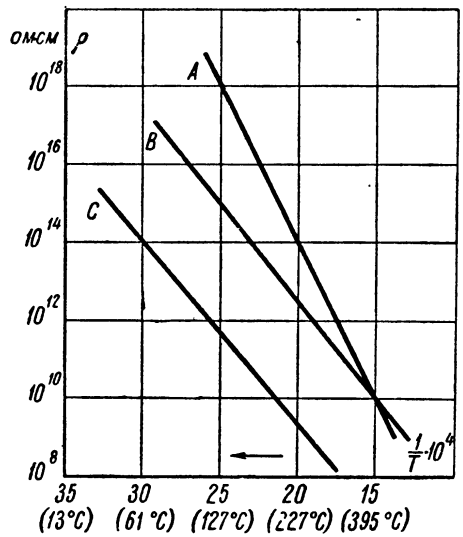


Рис. 33. Зависимость удельного объемного электросопротивления кварца от температуры:

A — плавленый кварц (аморфное состояние); *B* — кристаллический кварц, перпендикулярно главной оси; *C* — кристаллический кварц, параллельно главной оси.

Собственная электропроводность твердых тел и зависимость ее от температуры определяются структурой вещества и его составом.

В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей электропроводностью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла NaCl электропроводность значительно выше, чем для кристаллов MgO или Al_2O_3.

В некоторых кристаллах электропроводность неодинакова по разным осям кристалла. Так, в кварце электропроводность в направлении, параллельном главной оси, примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси, что видно из рис. 33. Для

большинства ионных кристаллов коэффициент b в формулах (64) и (68) близок к величине 10 000.

В кристаллических телах с молекулярной решеткой (сера, полиэтилен, парафин) электропроводность мала и определяется только примесями.

Электропроводность аморфных тел связана прежде всего с их составом.

Высокомолекулярные органические полимеры обладают электропроводностью, зависящей в сильной степени от ряда факторов: от химического состава и наличия примесей, от степени полимеризации (например для феноло-формальдегидной смолы), от степени вулканизации (для эбонита). Органические нейтральные аморфные диэлектрики, как, например, полистирол, отличаются очень малой электропроводностью.

Большую группу аморфных тел составляют неорганические стекла. Электропроводность стекол самым тесным образом связана с химическим составом, что дает возможность в ряде случаев получать заранее заданную величину электропроводности.

Кварцевое стекло — плавленый кварц — и плавленый борный ангидрид обладают весьма малой электропроводностью. Температурная зависимость электропроводности этих стекол значительна; коэффициент $b \approx 22\,000$, что указывает на большую энергию освобождения ионов.

Введение в состав стекла окислов металлов разных групп таблицы Менделеева по-разному отражается на электропроводности. Введение в состав стекла окислов щелочных металлов первой группы сильно увеличивает электропроводность; это увеличение зависит от радиуса иона. Ион натрия, имеющий меньший радиус, чем ион калия, увеличивает электропроводность в большей мере, чем последний.

Коэффициент b стекла со щелочными ионами близок к 10 000.

Введение в состав стекла окислов тяжелых металлов (бария или свинца) не только нейтрализует вредное влияние щелочных окислов, но и приводит к значительному понижению электропроводности стекол.

В табл. 13 показаны значения удельных объемных электросопротивлений некоторых типичных стекол.

Таблица 13

Значения ρ для некоторых стекол

Наименование стекол	Удельное объемное электросопротивление при $t = 200°C$, *ом·см*
Натриевый пирекс	$2 \cdot 10^{8}$
Калиевый пирекс	$8 \cdot 10^{11}$
Свинцовое стекло	$2 \cdot 10^{12}$

При рассмотрении изоляторного фарфора как системы, содержащей стекло, оказалось возможным понизить электропроводность этого диэлектрика введением в его состав окиси бария.

На рис. 34 показаны значения удельных объемных электросопротивлений изоляторного фарфора и радиофарфора, содержащего окись бария, в зависимости от температуры.

Твердые пористые диэлектрики при наличии в них влаги, даже в ничтожных количествах, резко увеличивают свою электропроводность. Высушивание материалов повышает их электрическое сопротивление, но при нахождении высушенных материалов во влажной среде величина сопротивления вновь уменьшается.

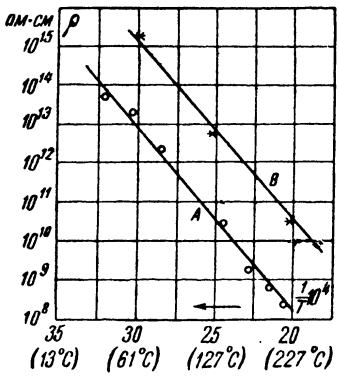


Рис. 34. Зависимость удельного объемного электросопротивления фарфора (*A*) и радиофарфора (*B*) от температуры.

Выше была рассмотрена электропроводность твердых тел при относительно невысоких напряженностях поля. При больших напряженностях необходимо учитывать возможность появления в кристаллических диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, благодаря чему наблюдается отступление от закона Ома.

При полях, превышающих 10^5 — 10^6 *в/см*, т. е. близких к пробивным, зависимость электронной электропроводности от силы поля может быть выражена эмпирической формулой Пуля:

$$\gamma_1 = \gamma e^{\beta E}, \tag{71}$$

где E — напряженность поля;

γ — электропроводность в области независимости γ от E;

β — коэффициент, характеризующий материал.

Для ряда материалов более точной оказывается формула Я. И. Френкеля:

$$\gamma_2 = \gamma e^{\beta_1 \sqrt{E}}. \tag{72}$$

Применение керамических диэлектриков при все более и более повышенных температурах вызвало необходимость тщательного изучения их электропроводности не только в слабых полях и при кратковременном воздействии напряжения, но также и в зависимости от длительности приложения напряжения в условиях разных температур и напряженностей электрического поля.

Временные зависимости удельного объемного электросопротивления титаносодержащей керамики имеют совершенно иной характер, нежели временные зависимости удельного объемного электросопротивления многих других диэлектриков: каменной соли, кальцита, стекол. Для этих диэлектриков имеет место увеличение удельного объемного электросопротивления со временем в связи с эффектом так называемой высоковольтной поляризации.

Наоборот, удельное объемное электросопротивление титаносодержащей керамики (рутиловой, перовскитовой) уменьшается со време-

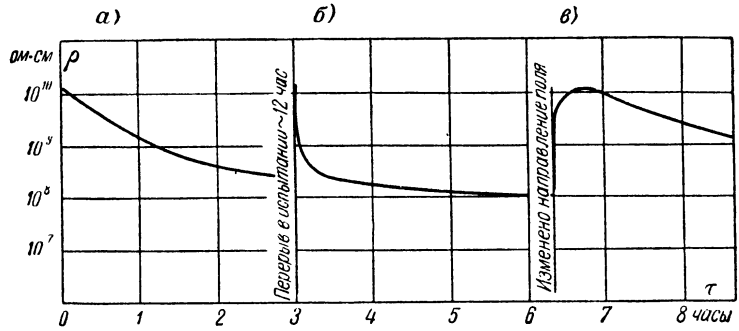


Рис. 35. Зависимость удельного объемного электросопротивления рутиловой керамики от длительности воздействия напряжения; $E = 500$ *в/мм*; $t = 250°$ С.

нем (рис. 35, *а*). Снятие напряжения — своего рода „отдых", а также изменение полярности восстанавливают удельное объемное электросопротивление до первоначального значения (рис. 35, *б* и *в*).

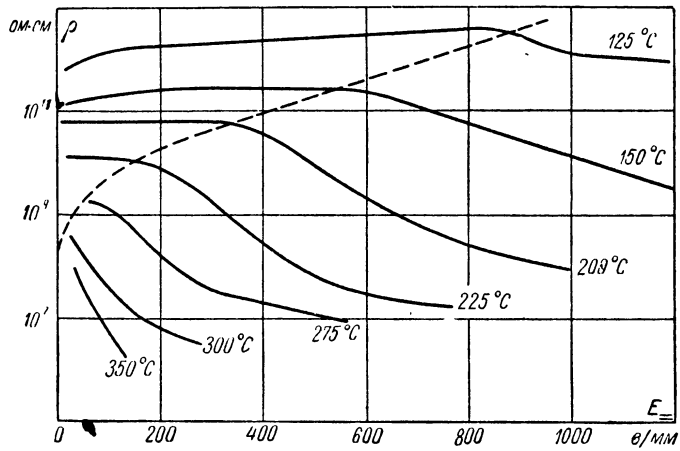


Рис. 36. Зависимость удельного объемного электросопротивления рутиловой керамики от напряженности электрического поля при разных температурах.

Отмеченное обратимое изменение удельного объемного электросопротивления получило название „ползучести". Ползучесть характеризуется не только изменением удельного объемного электросопротивления со временем, но и с напряженностью поля. Из рис. 36 видно, что для каждой температуры можно фиксировать определенное значение напряженности поля, когда начинается отклонение от закона Ома.

Керамические материалы, в отличие от органической изоляции, не стареют в смысле необратимых изменений свойств при действии высоких температур в обычных атмосферных условиях. Однако в электрическом поле наблюдается химическое старение керамики, часто приводящее к потере электрической прочности диэлектрика. Ползучесть способствует развитию процесса необратимого ухудшения электрических свойств титаносодержащей керамики. Необратимые изменения в титаносодержащей керамике объясняются выходом кислорода из решетки. Наиболее вероятен выход кислорода с поверхности образца и вблизи всякого рода дефектов — трещин, пор и др. В этом случае возникает отклонение от стехиометрического состава материала, которое может быть устранено лишь путем прокалки образца при высокой температуре в окислительной газовой среде.

Обязательным условием для электрохимического старения керамики является участие в электропроводности хотя бы одного сорта ионов диэлектрика. Если электропроводность чисто электронная, электрохимическое старение невозможно. В некоторых видах керамики, например рутиловой, перовскитовой и др., ионная электропроводность в сравнении с электронной ничтожно мала; и тем не менее она достаточна, чтобы, спустя некоторое время, при повышенной температуре и серебряных электродах происходило старение материала.

Поскольку электроды и диэлектрик в электрическом отношении представляют единую систему и между ними происходит обмен зарядами (одновременно на аноде и катоде), — в общем случае следует указать на пять механизмов электропроводности, как это показано в табл. 14.

I. Катион-катионная электропроводность. Подвижными являются ионы одного знака — катионы. Они выделяются у катода, нейтрализуясь и образуя атомы вещества (иногда дендриты). Однако это может иметь место, поскольку анодом являются такие металлы, как серебро, ионы которых диффундируют в диэлектрик и замещают собой превращающиеся в атомы катионы диэлектрика. В свою очередь ионы серебра в ряде случаев, участвуя в сквозной электропроводности, также нейтрализуются у катода с одновременным замещением их ионами с электрода.

II. Анион-катионная электропроводность. Подвижными являются и положительные, и отрицательные ионы. Они выделяются у катода и анода, соответственно нейтрализуясь и образуя атомы вещества.

III. Электрон-катионная электропроводность. Подвижными являются ионы одного знака — катионы, выделяющиеся из электрода (анода). При этом у катода электрон переходит в диэлектрик и восстанавливает катион диэлектрика. Этот механизм обычно имеет место в диэлектриках с катионами переменной валентности; например, в титаносодержащей керамике наряду с чисто электронным

Таблица 14

Классификация механизмов электропроводности радиокерамики

№ п/п.	Механизм электропроводности	Вид керамики, характеризующейся данным механизмом электропроводности	Особенности электропроводности
I	Катион-катионная	Керамика с подвижными катионами (муллитовая, клиноэнстатитовая, корундовая), при серебряных электродах	Движение ионов-носителей (Ag^{+1}, Me^{+})* в одном направлении
II	Анион-катионная	Керамика с подвижными ионами, преимущественно при высоких температурах	Движение ионов-носителей (O^{-2}, Me^{+}) в противоположном направлении
III	Электрон-катионная	Керамика с переменной валентностью катионов, при серебряных электродах	Движение носителей (Ag^{+1}, e^{-}) в противоположном направлении. Процесс электровосстановления по реакции: $Ti^{+4} \rightarrow Ti^{+3} + Ag^{+1}$
IV	Электрон-анионная	Керамика с переменной валентностью катионов, преимущественно при высоких температурах	Движение носителей (O^{-2}, e^{-}) в одном направлении. Процесс электровосстановления по реакции**: $Ti^{+4} + e^{-} \rightarrow Ti^{+3}$
V	Чисто электронная	Керамика на основе соединений с атомной решеткой типа нитрида бора.	Движение носителей-электронов в одном направлении. Электрохимическое старение исключено

* Me — общее обозначение металла.

** Выделение кислорода при этом возможно также вне электродов („безэлектродный процесс").

током идет процесс электровосстановления двуокиси титана по реакции:

$$Ti^{+4} \rightarrow Ti^{+3} + Ag^{+1}.$$

Ионы серебра мигрируют в первую очередь по поверхности и дефектам керамики.

IV. Электрон-анионная электропроводность. Подвижными являются ионы одного знака — анионы. Они выделяются у анода или в дефектах решетки, нейтрализуясь, образуя атомы вещества и дефектные центры; например, в титаносодержащей кера-

мике наряду с чисто электронным током идет процесс электровосстановления двуокиси титана по реакции:

$$Ti^{+4} + e^- \rightarrow Ti^{+3}.$$

V. Чисто электронная электропроводность. Такой вид электропроводности характерен для веществ с атомной решеткой и окислов металлов большой валентности при низких температурах.

Перечисленные виды электропроводности часто накладываются один на другой. Для двуокиси титана при невысоких температурах наблюдается чисто электронная электропроводность, при повышенных температурах — также электрон-анионная и, наконец, при повышенных температурах и серебряных электродах появляется электрон-катионная составляющая электропроводности. В результате прогрессирующего уменьшения удельного объемного электросопротивления при повышенных температурах наступает пробой. Старение алюмосиликатной керамики — фарфора, стеатита и др., с большой ионной проводимостью, при повышенных температурах и серебряных электродах обусловливается образованием дендритов, в частности, серебра.

Материалы, содержащие свободную двуокись титана, например рутиловая керамика, особенно неблагоприятны с точки зрения их применения при повышенных температурах. Несколько лучшими характеристиками отличается керамика на основе химических соединений с двуокисью титана. Другим классом материалов с рассматриваемой точки зрения являются беститановая керамика (алюмосиликатная, цирконатовая, станнатная), у которой явление старения очень ослаблено.

О природе электропроводности керамических материалов, электронной или ионной, обычно судят, пользуясь на протяжении ряда лет так называемой методикой Тубанда, заключающейся во взвешивании испытуемого образца и электродов в исходном состоянии и после длительного прохождения тока через образец. Такая методика является достаточно сложной.

Работы по изучению природы электропроводности керамики показали, что характер электропроводности может быть гораздо проще обнаружен путем сопоставления экспериментальных зависимостей тока от времени при серебряных и платиновых (или золотых) электродах. Эта методика основана на том, что при серебряных электродах наблюдается диффузия серебра в керамику. Ионная электропроводность имеет место, если в случае платиновых электродов ток резко спадает со временем, а в случае серебряных электродов, когда механизм электропроводности отвечает пп. I и III приведенной классификации, явление абсорбции почти не обнаруживается. Отсутствие зависимости тока от времени при платиновых и серебряных электродах позволяет прийти к выводу о наличии чисто электронной электропроводности. Если же в обоих случаях наблюдается одинаковая зависимость тока от времени, то это говорит не о наличии ионной электропроводности, а о присутствии замедленных механизмов поляризации.

На рис. 37 показан характер зависимости тока проводимости от времени при постоянном напряжении для керамики с электронной и ионной электропроводностью.

При нормальной температуре и невысокой относительной влажности окружающей среды детали из разных видов электрокерамики характеризуются высоким значением сопротивления изоляции, более 10^{14} *ом*; однако при повышенных и высоких температурах необходимо применять керамику специального состава.

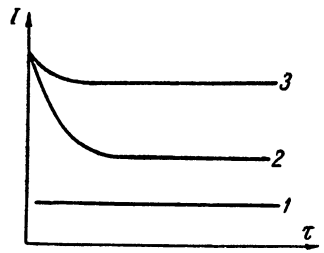


Рис. 37. Зависимость тока проводимости от времени при постоянном напряжении.

1 — электронная электропроводность, платиновые и серебряные электроды; *2* — ионная электропроводность, платиновые электроды; *3* — ионная электропроводность, серебряные электроды.

Произведение из сопротивления изоляции диэлектрика конденсатора на его емкость принято называть *постоянной времени* конденсатора:

$$\tau_0 = R_{из} C. \qquad (73)$$

Значение τ_0 определяется из выражения:

$$U = U_0 e^{-\frac{\tau}{\tau_0}}; \qquad (74)$$

$$U_{\tau_0} = U_0 e^{-\frac{\tau_0}{\tau_0}} = \frac{U_0}{e};$$

здесь U — напряжение на электродах конденсатора спустя время τ после отключения его от источника напряжения;

U_{τ_0} — то же спустя время τ_0;

U_0 — напряжение, до которого был заряжен конденсатор (при $\tau = 0$);

$R_{из}$ — сопротивление изоляции;

C — емкость конденсатора.

Легко показать, что

$$\tau_0 = R_{из} C = 0{,}884 \cdot 10^{-13} \rho \cdot \varepsilon'. \qquad (75)$$

Величину τ_0 выражают в *ом·ф*, *Мом·мкф* или в секундах:

$$ом \cdot ф = \frac{в}{а} \cdot \frac{а \cdot сек}{в} = сек.$$

Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков

Поверхностная электропроводность обусловлена присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Вода отличается, как указывалось выше, значительной электропроводностью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная электропроводность, определяемая в основном толщиной этого слоя.

Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностную проводимость обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому величина относительной влажности является решающим фактором, определяющим значение поверхностной электропроводности диэлектри-

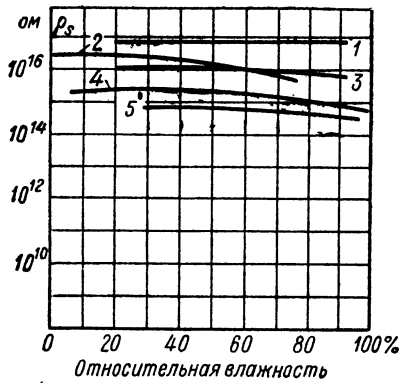


Рис. 38. Зависимость удельного поверхностного электросопротивления от относительной влажности для диэлектриков 1-й группы (нейтральные и полярные, не растворимые в воде).

1 — церезин; *2* — алюминоксид; *3* — парафин; *4* — микалекс; *5* — пчелиный воск.

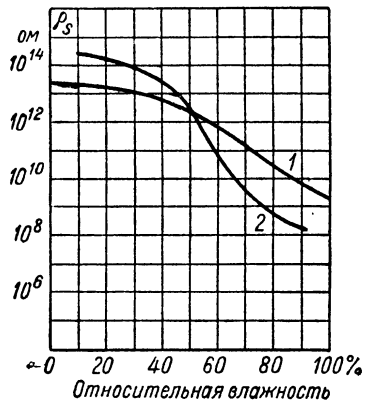


Рис. 39. Зависимость удельного поверхностного электросопротивления от относительной влажности для диэлектриков 2-й группы (частично растворимые в воде).

1 — щелочное стекло; *2* — боратное стекло.

ка. Особенно резкое уменьшение поверхностного электросопротивления обычно наблюдается при значениях относительной влажности, превышающих 50%.

Поверхностная электропроводность тем ниже, чем меньше полярность вещества и чем чище поверхность диэлектрика.

Присутствие загрязнений на поверхности относительно мало сказывается на поверхностной электропроводности гидрофобных диэлектриков и сильно влияет на электропроводность гидрофильных диэлектриков.

С точки зрения поверхностной электропроводности все материалы можно подразделить на несколько групп:

1) не растворимые в воде диэлектрики;

2) частично растворимые в воде диэлектрики;

3) диэлектрики, имеющие пористую структуру.

1. Нерастворимые диэлектрики делятся на две подгруппы:

а) нейтральные и слабополярные — не смачивающиеся водой (парафин, полистирол, янтарь, сера);

б) полярные — смачивающиеся водой (некоторые виды керамики и плотные дипольные органические материалы).

Все материалы первой подгруппы характеризуются высоким удельным поверхностным электросопротивлением, мало зависящим от влажности окружающей среды. Поверхностное электросопротивление материалов второй подгруппы во влажной среде ниже, чем у материалов первой подгруппы, но может быть все же достаточно большим при полном отсутствии загрязнений на их поверхности.

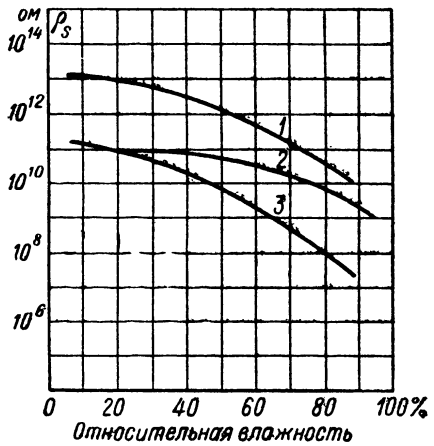


Рис. 40. Зависимость удельного поверхностного электросопротивления от относительной влажности для диэлектриков 3-й группы (с пористой структурой).

1 — фенопласт (пластмасса на феноло-формальдегидной смоле); *2* — целлулоид; *3* — мрамор.

2. Частично растворимые в воде диэлектрики. К этой группе относится большинство технических стекол. Таким материалам свойственно более низкое удельное поверхностное электросопротивление, в значительной мере зависящее от влажности.

3. Диэлектрики, имеющие пористую структуру. К таким диэлектрикам нужно отнести волокнистые материалы (органические и неорганические), мрамор, талькохлорит и большинство пластических масс. Благодаря пористой структуре во влажной среде эти материалы обнаруживают большую электропроводность.

Характер зависимости удельного поверхностного электросопротивления от относительной влажности окружающей среды для материалов первой, второй и третьей групп можно видеть из кривых рис. 38, 39, 40.

Сильное влияние загрязнения поверхности некоторых диэлектриков первой и второй групп на величину их удельного электросопротивления показано в табл. 15.

Таблица 15

Значения удельного поверхностного электросопротивления некоторых материалов при 70% относительной влажности

Наименование диэлектрика	ρ_s, *ом*, при неочищенной поверхности	ρ_s, *ом*, после очистки поверхности
Оконное стекло	$2 \cdot 10^{8}$	$3 \cdot 10^{11}$
Плавленый кварц	$2 \cdot 10^{8}$	$1 \cdot 10^{18}$
Микалекс	$1 \cdot 10^{9}$	$1 \cdot 10^{18}$

Стремясь повысить поверхностное электросопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности — промывку водой, растворителями, прокаливание при температуре 600 — 700°С.

Наиболее эффективной является очистка поверхности изделия, не впитывающего воду, продолжительным кипячением в дистиллированной воде.

Пропитка поверхностных слоев детали парафином или церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений ρ_s при высокой влажности ввиду возможности проникновения влаги в микропоры поверхности изделия за счет влагопроницаемости перечисленных выше защитных покрытий.

Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает величину поверхностного электросопротивления изделий во влажной среде.

В итоге можно прийти к следующим положениям в отношении явления поверхностной электропроводности. Зависимость поверхностной электропроводности от влажности вызывается наличием на поверхности диэлектрика гигроскопических и диссоциирующих на ионы веществ. Влага, адсорбируемая поверхностью, способствует их выявлению. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то путем их удаления можно получать высокие значения поверхностного электросопротивления при любой влажности воздуха. Если эти вещества являются составной частью материала, то поверхностное электросопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

§ 6. Потери в диэлектриках

Основные понятия

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Потери энергии в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном напряжении, поскольку в материале обнаруживается сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется, как указывалось выше, величинами удельных объемного и поверхностного электросопротивлений. При переменном напряжении необходимо использовать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозной проводимости, возникает ряд добавочных причин, вызывающих потери энергии в диэлектрике.

Величину диэлектрических потерь в изолирующем материале можно характеризовать величиной рассеиваемой мощности, отнесенной к единице объема, или удельными потерями, мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости ε''; чаще для характе-

ристики способности диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь δ называется угол, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током и напряжением в емкостной цепи. В случае идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на угол 90°; при этом угол δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем меньше угол сдвига фаз φ и тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция $\operatorname{tg}\delta$.

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению.

Если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог бы создаться недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери нежелательны, так как они увеличивают активное электросопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик, а следовательно, и величину затухания контура, равную:

$$d = d_L + d_C = \frac{R}{\omega L} + \operatorname{tg}\delta, \tag{76}$$

причем

$$\Delta f = f_{\text{рез}} d, \tag{77}$$

где R — активное электросопротивление проводов контура;
L — индуктивность контура;
ω — угловая частота;
Δf — полоса пропускания контура;
$f_{\text{рез}}$ — резонансная частота;
d — затухание контура;
$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь использованных в колебательном контуре диэлектриков.

На рис. 41 показано, что для получения узкой полосы пропускания (острой настройки на резонанс) необходимо иметь колебательный контур с малым затуханием.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от состояния вещества: газообразного, жидкого, твердого.

Диэлектрические потери могут обусловливаться сквозным током или, как указывалось при рассмотрении явления поляризации, активными составляющими поляризационных токов.

Для изучения диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно рассмотреть зависимость электрического заряда на обкладках конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения (рис. 42).

При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения (рис. 42, *а*).

Если в диэлектрике имеет место замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид эллипса (рис. 42, *б*). Площадь этого эллипса пропорциональна количеству энергии, поглощаемой диэлектриком за один период изменения напряжения.

В случае сегнетоэлектрика кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид петли такого же характера, как петля гистерезиса в магнитных материалах (рис. 42, *в*); и в этом случае площадь петли пропорциональна потерям энергии за один период.

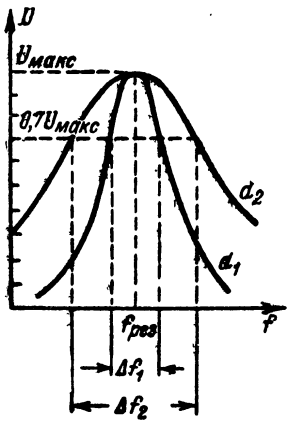


Рис. 41. Полоса пропускания колебательного контура в зависимости от величины затухания $d_1 < d_2$.

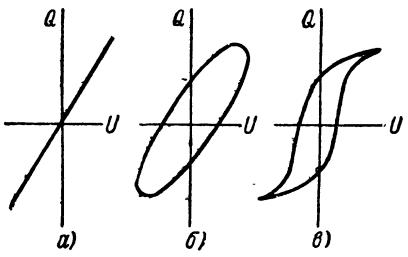


Рис. 42. Зависимость заряда от напряжения для диэлектрика без потерь (*а*), с потерями (*б*) и для сегнетоэлектрика (*в*).

В технических изолирующих материалах, помимо потерь от сквозной электропроводности и потерь от замедленной поляризации самого диэлектрика, возникают дополнительные диэлектрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием посторонних полупроводящих примесей (влаги, окислов железа, углерода и др.) и значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале.

В случае высоких напряжений дополнительные потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектрика, особенно интенсивно происходящей при радиочастотах.

Изучение потерь энергии в диэлектрике можно связать с рассмотрением поведения конденсатора с данным диэлектриком в цепи переменного напряжения.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями. Эта схема должна быть выбрана с таким расчетом, чтобы активная мощность, расходуемая в данной схеме, была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а ток был бы сдвинут относительно напряжения на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

Поставленная задача может быть решена заменой конденсатора с потерями идеальным конденсатором с параллельно включенным активным сопротивлением (параллельная схема) или конденсатором с последовательным сопротивлением (последовательная схема). Такие эквивалентные схемы, конечно, не дают объяснения механизма диэлектрических потерь и введены только условно.

Параллельная и последовательная схемы представлены на рис. 43, *а* и *б*. Там же даны соответствующие диаграммы токов и напряжений.

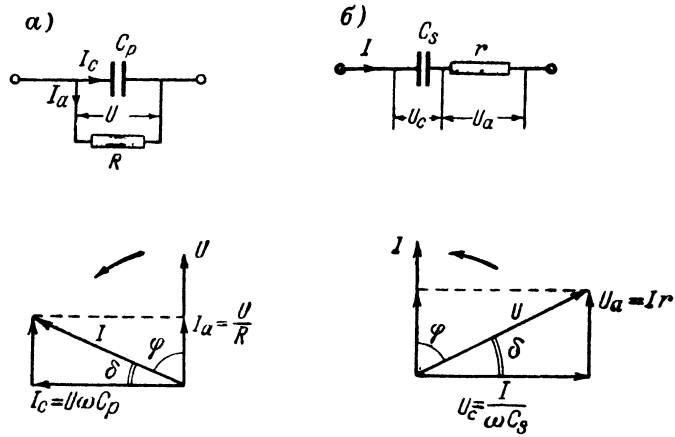


Рис. 43. Параллельная (*а*) и последовательная (*б*) эквивалентные схемы диэлектрика с потерями и векторные диаграммы для них.

Обе схемы эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $Z_1 = Z_2 = Z$ будут равны соответственно их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока относительно напряжения φ равны и значения активной мощности одинаковы.

Для параллельной схемы из векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{1}{\omega C_p R}; \tag{78}$$

$$P_a = UI_a = U^2\omega C_p \operatorname{tg}\delta. \tag{79}$$

Для последовательной схемы:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{U_a}{U_c} = \omega C_s r; \tag{80}$$

$$P_a = IU_a = I^2 r = \frac{U^2 r}{x^2 + r^2} = \frac{U^2 r}{x^2\left(1 + \frac{r^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2\omega C_s \operatorname{tg}\delta}{1 + \operatorname{tg}^2\delta}. \tag{81}$$

Приравнивая выражения (79) и (81), а также (78) и (80), найдем соотношения между C_p и C_s и между R и r:

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2\delta}; \tag{82}$$

$$R = r\left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\delta}\right). \tag{83}$$

Для доброкачественных диэлектриков можно пренебречь значением $\operatorname{tg}^2\delta$ по сравнению с единицей в формуле (82) и считать $C_p \approx \approx C_s \approx C$. Выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут также одинаковы для обеих схем:

$$P_a = U^2\omega C \operatorname{tg}\delta, \tag{84}$$

где P_a выражено в ваттах, U — в вольтах, ω — в $сек^{-1}$, C — в фарадах.

Следует отметить, что при переменном напряжении, в отличие от постоянного, емкость диэлектрика с большими потерями становится совершенно условной величиной в зависимости от выбора той или иной эквивалентной схемы. Отсюда и диэлектрическая проницаемость материала с большими потерями при переменном напряжении также условна.

Сопротивление R в параллельной схеме, как следует из выражения (83), во много раз больше сопротивления r. Угол потерь от выбора схемы не зависит.

В качестве примера в табл. 16 приведены значения относительной диэлектрической проницаемости для некоторых материалов, имеющих высокое значение $\operatorname{tg}\delta$.

Таблица 16

Значения относительной диэлектрической проницаемости диэлектриков с большими потерями

Наименование характеристики	Материал	
	увлажненная пластмасса (фенопласт)	увлажненная кабельная бумага
Тангенс угла потерь . . .	0,66	0,35
Условная относительная диэлектрическая проницаемость:		
по последовательной схеме	28	4,8
по параллельной схеме	19,5	4,27

Определив каким-либо методом при некоторой частоте параметры эквивалентной схемы исследуемого диэлектрика (C_p и R или C_s и r), в общем случае нельзя считать полученные значения емкости и сопротивления присущими данному конденсатору и пользоваться этими величинами для расчета угла потерь при другой частоте. Такой расчет может быть сделан только в том случае, если эквивалентная схема имеет определенное физическое обоснование. Так, например, если известно для данного диэлектрика, что потери в нем определяются только потерями проводимости в широком диапазоне частот, то угол потерь конденсатора с таким диэлектриком может быть вычислен для любой частоты, лежащей в этом диапазоне, по формуле (78). Потери в таком конденсаторе, как легко видеть, не зависят от частоты и определяются выражением

$$P_a = \frac{U^2}{R}.$$

Наоборот, если потери в конденсаторе обусловливаются главным образом сопротивлением подводящих и соединительных проводов, а также сопротивлением самих электродов (обкладок), например тонким слоем серебра в слюдяном или керамическом конденсаторе, то рассеиваемая мощность в таком конденсаторе будет возрастать с частотой пропорционально квадрату частоты:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta = U^2 \omega C \omega C r = U^2 \omega^2 C^2 r. \qquad (86)$$

Из последнего выражения можно сделать весьма важный практический вывод: конденсаторы, предназначенные для работы на высокой частоте, должны иметь по возможности малое сопротивление как обкладок, так и соединительных проводов и переходных контактов.

В большинстве случаев потери в конденсаторе не могут быть полностью объяснены ни первым, ни вторым из вышеприведенных факторов, и тогда необходимо производить определение параметров конденсатора именно при той частоте, при которой он будет использован.

Выражение для удельных диэлектрических потерь, т. е. мощности, рассеиваемой в 1 $см^3$ диэлектрика, имеет вид:

$$p = \frac{\varepsilon' f \operatorname{tg}\delta}{1{,}8 \cdot 10^{12}} E^2, \qquad (87)$$

где p — удельные потери, $вт/см^3$;
$\omega = 2\pi f$ — угловая частота, $сек^{-1}$;
E — напряженность электрического поля, $в/см$.

Так как емкость между противоположными гранями куба со стороной 1 $см$ составляет

$$C = \frac{\varepsilon' \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-4}}{36\pi \cdot 10^{-2}} [ф],$$

то реактивная составляющая удельной электропроводности равна:

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon' f}{1{,}8 \cdot 10^{12}} [ом^{-1} \cdot см^{-1}] \qquad (88)$$

и активная составляющая:

$$\gamma_a = \frac{\varepsilon' f \operatorname{tg}\delta}{1{,}8 \cdot 10^{12}} \left[ом^{-1} \cdot см^{-1}\right]; \qquad (89)$$

полная удельная электропроводность может быть выражена в виде комплекса:

$$\overset{*}{\gamma} = \gamma_a + j\gamma_c = \frac{\varepsilon' f}{1{,}8 \cdot 10^{12}} \left(\operatorname{tg}\delta + j\right). \qquad (90)$$

Диэлектрик, обладающий диэлектрическими потерями, можно также характеризовать так называемой комплексной диэлектрической проницаемостью, как это было показано в § 2. При этом из (89) и (88) имеем:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\gamma_a}{\gamma_c} = \frac{\gamma'_a \cdot 1{,}8 \cdot 10^{12}}{10^2 \varepsilon' f} = \frac{\gamma'_a}{\omega \varepsilon' \varepsilon_0} = \frac{\gamma'_a}{\omega \varepsilon}; \qquad (18)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg}\delta; \qquad (91)$$

$$\gamma'_a = \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg}\delta \qquad [ом^{-1} \cdot м^{-1}]. \qquad (92)$$

Последнее выражение используется для вычисления активной проводимости при различных частотах по измеренным значениям относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь материала при этих значениях частоты.

Рассматривая выражения (84) и (87), можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных, высокочастотных устройствах, поскольку величина диэлектрических потерь пропорциональна квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте тока. Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малой величиной угла потерь и диэлектрической проницаемости, так как в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может достигнуть недопустимо больших значений.

Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
2) диэлектрические потери сквозной электропроводности;
3) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры;
4) ионизационные диэлектрические потери.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особо отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери обусловлены нарушением теплового движения частиц под влиянием сил

электрического поля. Это нарушение приводит к рассеиванию энергии и нагреву диэлектрика. Релаксационные потери возрастают с частотой приложенного напряжения и характеризуются наличием взаимосвязанных максимумов в частотной и температурной зависимостях потерь, определяемых временем релаксации (рис. 22 и 27).

С ростом температуры частотный максимум потерь сдвигается в область более высоких частот.

Диэлектрические потери, наблюдаемые в сегнетоэлектриках, связаны с явлением спонтанной поляризации. Поэтому потери в сегнетоэлектриках значительны при температурах ниже точки Кюри, когда имеет место спонтанная поляризация. Потери этого вида возрастают с частотой приложенного напряжения. При температурах выше точки Кюри потери в сегнетоэлектриках уменьшаются. Электрическое старение сегнетоэлектрика со временем сопровождается некоторым уменьшением потерь.

К диэлектрическим потерям, обусловленным поляризацией, следует отнести также так называемые резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при световых частотах (рис. 22). Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля.

Резонансные потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества (см. § 4). Наличие максимума в частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура на положение максимума не влияет.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную электропроводность, объемную или поверхностную. Если при этом потери от других механизмов несущественны, то величина тангенса угла диэлектрических потерь может быть вычислена по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1{,}8\cdot 10^{12}}{\varepsilon' f \rho}. \tag{93}$$

Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты приложенного напряжения; $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону. Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с температурой по экспоненциальному закону вида:

$$P_{a,T} = Ae^{-\frac{b}{T}}, \tag{94}$$

где A, b — постоянные материала, или

$$P_{a,t} = P_{a,0}e^{\alpha t}, \tag{95}$$

где $P_{a,t}$ — потери при температуре $t°$ С;

$P_{a,0}$ — потери при температуре 0° С;

α — постоянная материала;

t — температура, ° С;

$\operatorname{tg}\delta$ в зависимости от температуры изменяется по тому же закону.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа.

Приближенно ионизационные потери могут быть вычислены по формуле

$$P_{и} = A_1 f (U - U_0)^3, \tag{96}$$

где A_1 — постоянный коэффициент;

f — частота тока;

U — приложенное напряжение;

U_0 — напряжение, соответствующее началу ионизации.

Формула справедлива при $U > U_0$ и линейной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от E. Величина ионизирующего напряжения U_0 зависит от давления, при котором находится газ, поскольку развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега электронов. С увеличением давления газа выше атмосферного величина напряжения начала ионизации возрастает.

Неоднородность структуры диэлектрика, обусловленная случайными примесями или отдельными компонентами, намеренно введенными в диэлектрик для требуемого изменения его свойств, может приводить к появлению дополнительных диэлектрических потерь. Случайными примесями в диэлектрике могут быть, в частности, полупроводящие вещества, например восстановленные окислы, образовавшиеся в диэлектрике или попавшие в него в процессе изготовления.

В число неоднородных по составу диэлектриков входят, например, пропитанная бумага, пластические массы с наполнителем, пористая изоляция, содержащая воздух и примеси влаги.

Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков и особенностей содержащихся в них компонентов не существует общей формулы расчета диэлектрических потерь в этом случае.

В простейшем случае можно представить себе неоднородный диэлектрик в виде двух слоев, включенных последовательно. Эквивалентная схема замещения такого неоднородного диэлектрика может быть представлена в виде двух конденсаторов, включенных последовательно, как показано на рис. 44, *а*.

Величина эквивалентных емкостей C_1 и C_2 зависит от диэлектрической проницаемости этих слоев и их геометрических размеров. Сопротивления R_1 и R_2 определяются удельным объемным электросопротивлением слоев и их геометрическими размерами.

Анализируя схему рис. 44, *а*, легко показать, что величина tgδ определяется формулой:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\omega^2 n + m}{\omega M + \omega^3 N}, \tag{97}$$

где

$$m = R_1 + R_2;$$
$$n = C_2^2 R_2^2 R_1 + C_1^2 R_1^2 R_2;$$
$$M = C_1 R_1^2 + C_2 R_2^2;$$
$$N = C_2^2 R_2^2 C_1 R_1^2 + C_1^2 R_1^2 C_2 R_2^2.$$

Если R_1, R_2, C_1 и C_2 не зависят от частоты и потери обусловливаются только электропроводностью, то после дифференцирования по

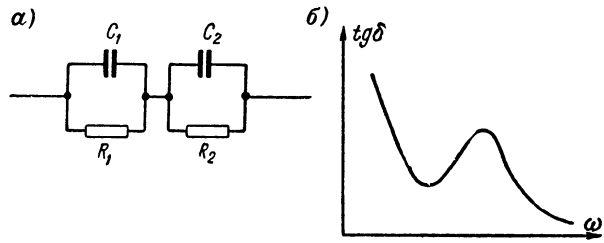


Рис. 44. Эквивалентная схема замещения двухслойного диэлектрика (*а*) и зависимость tg δ от частоты для этого же диэлектрика (*б*).

частоте уравнения (97) и приравнивания результата дифференцирования нулю получают выражение, из которого видно, что tg δ имеет минимум и максимум в зависимости от частоты, что и показано на рис. 44, *б*.

Максимальное значение tg δ наблюдается при частоте

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{Mn - 3Nm + \sqrt{\Delta}}{2Nn}}, \tag{98}$$

а минимальное — при частоте

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{Mn - 3Nm - \sqrt{\Delta}}{2Nn}}, \tag{99}$$

где

$$\Delta = (Mn - 3Nm)^2 - 4MNmn. \tag{100}$$

Значение tg δ слоистого диэлектрика при определенной частоте и последовательном включении слоев может быть также рассчитано по формуле

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{C_2 \operatorname{tg}\delta_1 + C_1 \operatorname{tg}\delta_2}{C_1 + C_2}, \tag{101}$$

где $\operatorname{tg}\delta_1$ и $\operatorname{tg}\delta_2$ — тангенсы угла потерь соответственных слоев.

Тангенс угла диэлектрических потерь сложного двухкомпонентного диэлектрика можно вычислить по формуле Назарова:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\gamma_{a1}\gamma_{a2}(\theta_2\gamma_{a1} + \theta_1\gamma_{a2}) + \omega(\theta_2\gamma_{a2}^2\varepsilon_1'^2 + \theta_1\gamma_{a1}\varepsilon_2'^2)}{\omega[(\theta_2\gamma_{a1}^2\varepsilon_2' + \theta_1\gamma_{a2}^2\varepsilon_1') + \omega^2\varepsilon_1'\varepsilon_2'(\theta_2\varepsilon_1' + \theta_1\varepsilon_2')]}, \qquad (1\,02)$$

где ε_1', ε_2' — относительные диэлектрические проницаемости компонентов;

γ_{a1}, γ_{a2} — активные проводимости компонентов при переменном напряжении;

θ_1, θ_2 — объемные концентрации компонентов в долях единицы ($\theta_1 + \theta_2 = 1$);

ω — угловая частота.

Основные сведения об особенностях различных видов потерь в диэлектриках сведены в табл. 17.

Таблица 17

Классификация потерь в диэлектриках

Виды диэлектрических потерь	Главные особенности	Виды диэлектриков
Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией:		
а) релаксационные (дипольные, ионные и электронные)	Наличие максимума потерь, зависящего от температуры и частоты	Дипольные жидкие и твердые диэлектрики, ионные с неплотной упаковкой
б) резонансные	Наличие резко выраженного максимума при некоторой частоте, положение которого не зависит от температуры	Все виды диэлектриков
в) потери при спонтанной поляризации	Велики; в области точки Кюри наблюдается резкое уменьшение	Сегнетоэлектрики
Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью	Независимость потерь от частоты и заметное возрастание с температурой; тангенс угла потерь с частотой снижается по гиперболе	Жидкие и твердые диэлектрики с большой электропроводностью
Ионизационные диэлектрические потери	Наблюдаются при напряжениях выше ионизационного	Газообразные диэлектрики и твердые диэлектрики с газовыми включениями
Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры	Сложная зависимость потерь от компонентов, входящих в состав диэлектрика, и случайных примесей	Неоднородные диэлектрики

Диэлектрические потери в газах

Диэлектрические потери в газах при напряженностях поля, лежащих ниже значения, необходимого для развития ударной ионизации молекул газов, очень малы. В этом случае газ можно практически рассматривать как идеальный диэлектрик.

Источником диэлектрических потерь газа может быть в основном только электропроводность, так как ориентация дипольных молекул газов при их поляризации не сопровождается диэлектрическими потерями. Как известно, все газы отличаются весьма малой электропроводностью, и угол диэлектрических потерь в связи с этим у них ничтожно мал, особенно при высоких частотах. Величина $\operatorname{tg}\delta$ может быть вычислена по формуле (93).

Удельное объемное электросопротивление газов порядка 10^{18} *ом·см*, $\varepsilon' \approx 1$ и $\operatorname{tg}\delta$ при $f = 50$ *гц* (при отсутствии ионизации) менее $4 \cdot 10^{-8}$.

При высоких напряжениях и неоднородном поле, когда напряженность в отдельных местах превзойдет некоторое критическое значение, молекулы газа ионизируются, вследствие чего в газе возникают потери на ионизацию.

Выражая потери на ионизацию формулой (84) и сопоставляя ее с формулой (96), видим, что величина $\operatorname{tg}\delta$ с увеличением напряжения должна возрастать. По возрастанию $\operatorname{tg}\delta$ с напряжением можно судить о наличии газовых включений и твердой изоляции.

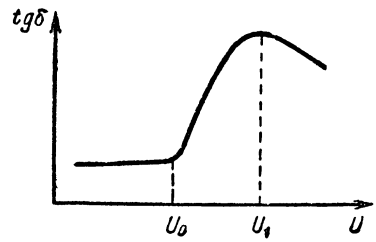


Рис. 45. Изменение $\operatorname{tg}\delta$ в зависимости от напряжения для твердой изоляции с воздушными включениями.

На рис. 45 показано влияние наличия газовых включений на характер изменения $\operatorname{tg}\delta$ с увеличением напряжения. При возрастании напряжения свыше U_0 (начало ионизации) $\operatorname{tg}\delta$ растет, при $U > U_1$, когда уже газ во включениях ионизирован и энергия на процесс ионизации уже не затрачивается, $\operatorname{tg}\delta$ уменьшается.

Кривую $\operatorname{tg}\delta = F(U)$ часто называют кривой ионизации. При высоких частотах ионизация и потери в газах возрастают настолько, что это явление может повести к разогреву и разрушению изделий с газовой изоляцией, если напряжение превышает ионизационное значение.

Возникновение ионизации газа, заполняющего закрытые поры в твердой изоляции, нередко приводит к такому же разрушению. Ионизация воздуха сопровождается образованием озона и окислов азота, что вызывает химическое разрушение органической изоляции, содержащей газовые включения.

Как было указано, в газообразных веществах наблюдаются резонансные диэлектрические потери.

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

В нейтральных жидкостях диэлектрические потери обусловлены только электропроводностью, если жидкость не содержит примесей с дипольными молекулами. Электропроводность нейтральных чистых жидкостей чрезвычайно мала, благодаря чему малы и диэлектрические потери. Примером может служить тщательно очищенное от примесей нефтяное конденсаторное масло, $\operatorname{tg}\delta$ которого очень мал и может быть рассчитан по формуле (93).

Полярные жидкости в зависимости от условий (температуры, частоты) могут обладать заметными потерями, связанными с дипольно-релаксационной поляризацией, помимо потерь, обусловленных электропроводностью.

Особенностью жидких диэлектриков с полярными молекулами служит зависимость диэлектрических потерь от величины вязкости. Электропроводность таких жидкостей при комнатной температуре составляет $10^{-12} - 10^{-13}$ *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$. Диэлектрические потери, наблюдаемые в вязких жидкостях при переменном напряжении, особенно при высоких частотах, значительно превосходят потери, обусловленные электропроводностью. Объяснение природы потерь в полярных вязких жидкостях можно дать, основываясь на представлениях о механизме дипольно-релаксационной поляризации.

Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии на трение с выделением тепла.

Если вязкость жидкости достаточно велика, молекулы не успевают следовать за изменением поля, и дипольная поляризация практически исчезает; диэлектрические потери при этом — малы. Дипольные потери будут также малы, если вязкость жидкости весьма мала и ориентация молекул происходит без трения. При средних значениях вязкости дипольные потери могут быть значительны и при некоторой вязкости имеют максимум.

Положение максимума определяется из условия

$$\omega = \frac{1}{\tau_0}, \tag{103}$$

где ω — угловая частота приложенного напряжения;

τ_0 — время релаксации.

Время релаксации τ_0 зависит от вязкости жидкости и, следовательно, от ее температуры.

На рис. 46 представлены изменения $\operatorname{tg}\delta$ с температурой для масляно-канифольного компаунда при двух значениях частоты. Следует отметить, что кривые, изображающие зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры, приближенно представляют (в измененном масштабе) и температурную зависимость диэлектрических потерь P_a.

При повышении частоты максимум $\operatorname{tg}\delta$ смещается в область более высокой температуры. Это находится в соответствии с формулой

(103): большее значение частоты требует меньшего значения времени релаксации, необходимого для получения максимума угла потерь, а

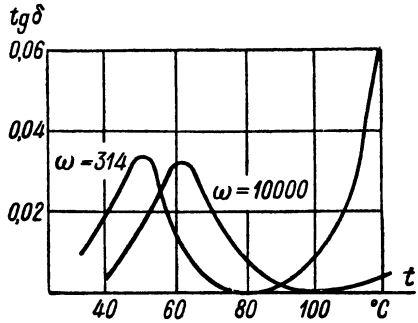


Рис. 46. Зависимость tg δ от температуры при разных частотах для масляно-канифольного компаунда.

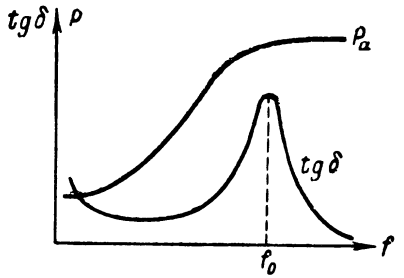


Рис. 47. Зависимость рассеиваемой мощности и tg δ от частоты для дипольной жидкости.

для уменьшения времени релаксации необходимо снижение вязкости, т. е. повышение температуры.

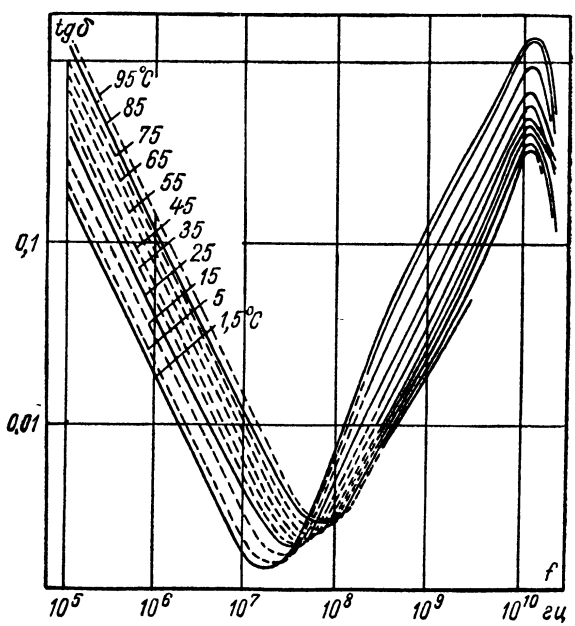


Рис. 48. Частотные характеристики tg δ воды при различных температурах.

Наименьшие величины $\operatorname{tg}\delta = F(t)$ соответствуют значениям температуры, при которых вязкость жидкости становится настолько малой,

что ориентация диполей происходит практически без трения. Потери в этом случае малы.

Дальнейшее возрастание tg δ с повышением температуры объясняется ростом электропроводности, обусловливающей величину диэлектрических потерь при повышенных температурах.

Характер зависимости величины рассеянной мощности P_a при дипольно-релаксационных потерях в жидком диэлектрике от частоты представлен на рис. 47 верхней кривой. Потери возрастают с частотой до тех пор, пока поляризация успевает следовать за изменением поля. Когда же частота становится настолько велика, что дипольные молекулы уже не успевают полностью ориентироваться в направлении поля и tg δ падает, то потери P_a становятся постоянными в соответствии с формулой (84).

Таким образом, характер зависимости диэлектрических потерь P_a от частоты не соответствует характеру частотной зависимости tg δ.

Дипольно-релаксационные потери в случае маловязких жидкостей при низких частотах незначительны и могут быть меньше потерь сквозной электропроводности. При радиочастотах дипольно-релаксационные потери даже при малой вязкости велики и преобладают над потерями электропроводности. Ввиду этого полярные жидкости не могут быть использованы в полях высокой частоты.

Кривые частотной зависимости tg δ воды — сильнополярной жидкости — в диапазоне радио- и сверхвысоких частот приведены на рис. 48. Как видно из рисунка, при частоте около 10^{10} *гц* наблюдается максимум tg δ, что соответствует рис. 26 и теоретическим представлениям о механизме дипольно-релаксационной поляризации.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках необходимо рассматривать в связи с их структурой. Твердые вещества обладают разнообразным составом и строением; в них возможны все виды диэлектрических потерь.

Для удобства рассмотрения диэлектрических потерь в твердых веществах последние можно подразделить на четыре группы: диэлектрики молекулярной структуры, ионной структуры, сегнетоэлектрики и диэлектрики неоднородной структуры.

Диэлектрические потери в диэлектриках молекулярной структуры зависят от вида молекул. В случае неполярных молекул, в веществах, не имеющих примесей, диэлектрические потери ничтожно малы. В нейтральных диэлектриках, как уже указывалось, имеет место только электронная поляризация. К таким диэлектрикам относятся сера, парафин, неполярные полимеры — полиэтилен, политетрафторэтилен (фторопласт-4), полистирол и др. Указанные вещества в связи с их весьма малыми потерями находят применение в качестве высокочастотных диэлектриков.

Диэлектрики молекулярной структуры с полярными молекулами представляют собой главным образом органические вещества, широко используемые в технике. К ним принадлежат: материалы на основе целлюлозы — бумага, картон и др., полярные полимеры — полиметилметакрилат (органическое стекло), полиамиды (капрон и др.) и полиуретаны, каучуковые материалы (эбонит), феноло-формальдегидные смолы (бакелит и др.), эфиры целлюлозы (ацетилцеллюлоза и др.) и ряд других материалов. Все они, благодаря присущей им дипольно-релаксационной поляризации, обладают большими потерями, особенно при радиочастотах.

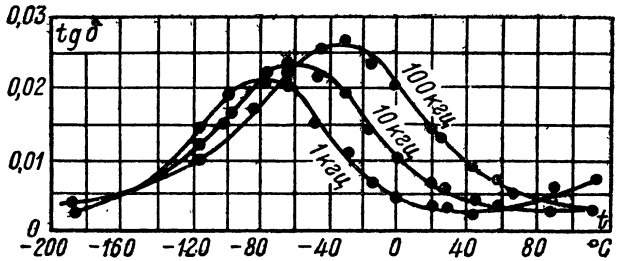


Рис. 49. Зависимость tg δ от температуры для высушенной бумаги.

Диэлектрические потери в этих диэлектриках связаны с температурой; при некоторых температурах обнаруживаются максимум и минимум потерь; возрастание потерь после минимума объясняется возникновением нового вида потерь — потерь сквозной электропроводности.

На рис. 49 представлены кривые зависимости tg δ от температуры для бумаги.

Обобщение закономерностей релаксационных потерь можно сделать, пользуясь в качестве примера льдом, образованным из дистиллированной воды. Частотные и температурные зависимости релаксационных потерь льда показаны на рис. 50. Если для воды, обладающей незначительной вязкостью, механизм релаксационной поляризации перестает проявляться при частотах $10^9 — 10^{11}$ *гц*, что соответствует второй слева ступеньке на общей кривой $\varepsilon' = F(f)$ рис. 22, то у льда — твердого тела с неплотной упаковкой частиц и низкой по сравнению с другими материалами тройной точкой фазовой диаграммы (рис. 51) — уменьшение поляризации наступает при частотах $10^2 — 10^4$ *гц*, как это видно из рис. 50, *а*. Кривые рис. 50, *г* показывают, что при частотах свыше 10^4 *гц* ε' льда при понижении температуры быстро падает до 2,8—3, так как ориентация частиц протекает медленно и не успевает развиться в течение коротких полупериодов действия напряжения.

При частотах, меньших 10^3 *гц*, даже при низких температурах порядка от —40 до —50° С, ε' льда оказывается больше 10. Снижение

поляризации связано, как указывалось выше, с временем релаксации и максимумами ε'' и $\operatorname{tg}\delta$. Максимумы ε'' в частотной зависимости (рис. 50, *в*) лежат против середины падающих участков кривых ε' при соответствующих температурах (см. также рис. 22), а возрастающие

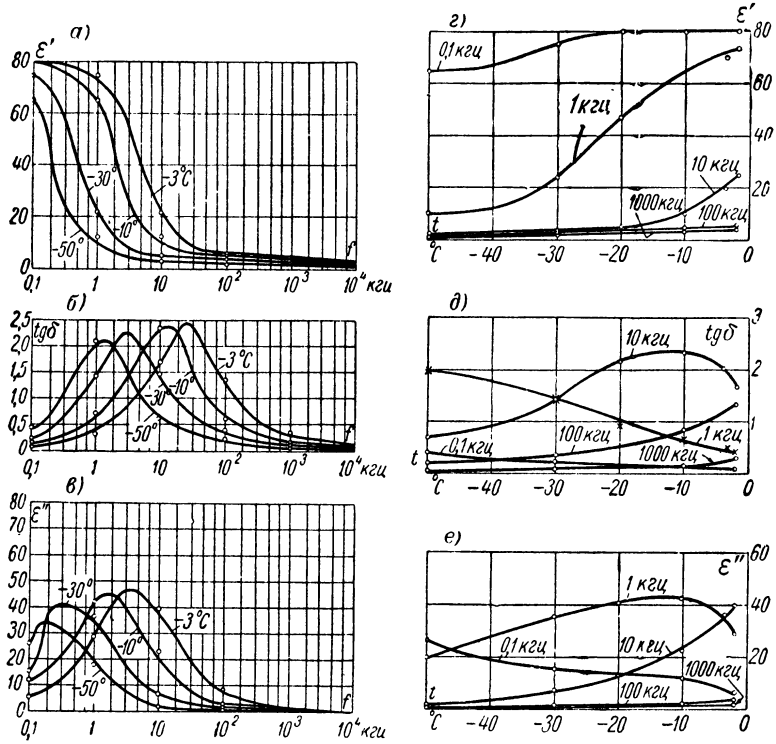


Рис. 50. Частотные и температурные зависимости составляющих комплексной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь льда.

с частотой по абсолютной величине максимумы $\operatorname{tg}\delta$ сдвинуты в область более высоких частот (рис. 50, *б*).

Температурные зависимости ε'' и $\operatorname{tg}\delta$ (рис. 50, *е* и *д*) показывают смещение температурного максимума потерь в область более высоких температур с увеличением частоты воздействующего на диэлектрик напряжения. Максимумы ε'' по сравнению с максимумами $\operatorname{tg}\delta$ при одинаковых частотах сдвинуты в область более высоких температур.

Взаимосвязь между температурами и частотами, которым соответствуют максимумы $\operatorname{tg}\delta$, показана на рис. 52. Аналогичная зависимость может быть установлена и для ε''. Из рисунка видно, что с ростом температуры частота f_m резко увеличивается, причем кривая получается близкой к экспоненте.

Подобные закономерности получаются наиболее четко выявленными при неизменном числе однотипных релаксаторов. При переменном числе релаксаторов кривые могут быть сложными.

Диэлектрические потери в твердых веществах ионной структуры связаны с особенностями упаковки ионов в решетке.

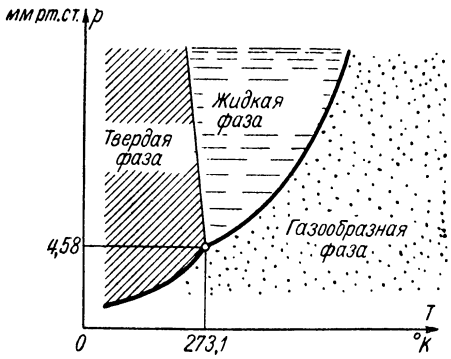


Рис. 51. Диаграмма фазовых состояний для воды.

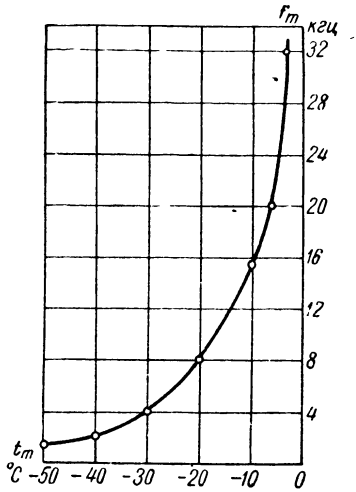


Рис. 52. Связь между частотой и температурой, которым соответствуют максимумы tg δ релаксационных потерь льда.

В веществах кристаллической структуры с плотной упаковкой ионов, при отсутствии примесей, искажающих решетку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в этих веществах появляются потери сквозной электропроводности. К веществам этого типа относятся многочисленные кристаллические неорганические соединения, имеющие большое значение в современном производстве электротехнической керамики, например корунд, входящий в состав ультрафарфора. Примером соединений такого рода является также каменная соль, чистые кристаллы которой обладают ничтожными потерями; малейшие примеси, искажающие решетку, резко увеличивают диэлектрические потери.

На рис. 53 показано влияние примесей на величину диэлектрических потерь каменной соли.

К диэлектрикам кристаллической структуры с неплотной упаков-

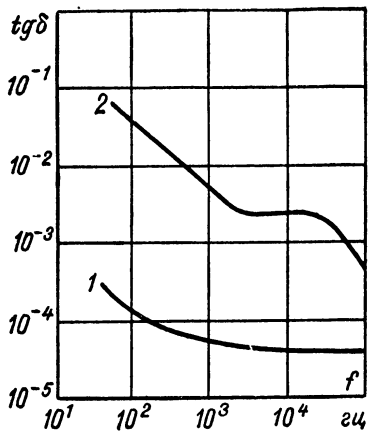


Рис. 53. Зависимость tg δ от частоты для каменной соли:
1 — чистая каменная соль; *2* — каменная соль, в решетку которой введена примесь.

кой ионов относится ряд кристаллических веществ, характеризующихся релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. Таковыми являются: муллит, входящий в состав изоляторного фарфора, кордиерит — компонент керамики с малым температурным коэффициентом расширения, β-глинозем (алюминат натрия), получающийся при обжиге глиноземистых изделий, γ-глинозем, минерал циркон, входящий в состав огнеупорной керамики, и др.

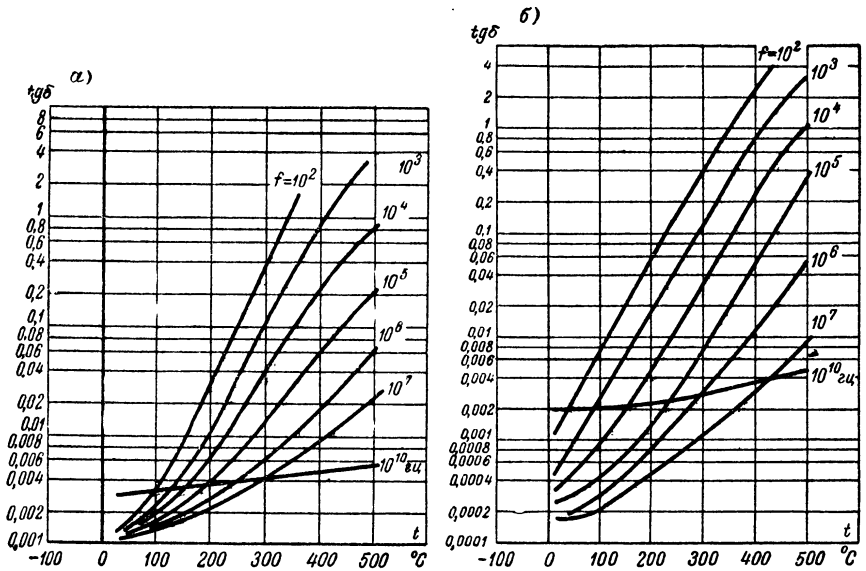


Рис. 54. Температурная зависимость tg δ стеатитовой (*а*) и титансодержащей (*б*) керамики при разных частотах.

Электрические свойства различных модификаций глинозема Al_2O_3, имеющих неодинаковую плотность упаковки ионов, приведены в таблице 18.

Так как для большинства видов электрокерамики количество ионов, участвующих в релаксационной поляризации, непрерывно возрастает с температурой (см. § 4), то максимум tg δ отсутствует, и температурная зависимость tg δ, подобно температурной зависимости электропроводности, в первом приближении имеет экспоненциальный характер (рис. 54).

Как видно из рис. 54, *а* и *б*, чем меньше частота поля, тем более резко tg δ изменяется с температурой.

Диэлектрические потери в аморфных веществах ионной структуры — неорганических стеклах — связаны с явлением поляризации и наличием электропроводности.

Рассматривая механизм диэлектрических потерь в стеклах, следует различать:

1) потери, мало зависящие от температуры и возрастающие прямо пропорционально росту частоты (tg δ не зависит от частоты);

2) потери, заметно возрастающие с температурой по закону экспоненциальной функции и мало зависящие от частоты (tg δ уменьшается с возрастанием частоты).

Таблица 18

Плотность и тангенс угла потерь различных модификаций окиси алюминия

Модификация	Плотность, *г/см*³	tg δ при 1 *Мгц* и 100° С
α-глинозем	3,99	Менее 0,0003
β-глинозем	3,60	0,0040
γ-глинозем	—	Более 0,1000

Потери первого вида обусловливаются релаксационной поляризацией и сильно выражены во всех технических стеклах. Чисто кварцевое стекло обладает весьма малыми релаксационными потерями. Введение в плавленый кварц небольшого количества окислов вызывает заметное возрастание диэлектрических потерь ввиду нарушения внутренней структуры стекла.

Термическая обработка — отжиг или закалка — заметно влияет на величину угла диэлектрических потерь стекла в связи с изменением его структуры.

В табл. 19 приведена зависимость угла потерь некоторых стекол от способа их термической обработки.

Таблица 19

Влияние термической обработки на угол потерь стекол

Способ обработки	Угол потерь в минутах $t = 20°C$ и $f = 10^6$ *гц*	
	Стекло силикатно-натриевое	Стекло свинцовое
Нормальный отжиг	25	4
Длительный отжиг при низкой температуре с последующим быстрым охлаждением	28	5
Кратковременный отжиг с быстрым охлаждением	35	5
Закалка	43	7

Потери второго вида вызываются передвижениями слабо связанных ионов и должны рассматриваться как потери, обусловленные электропроводностью. Такие потери проявляются обычно при температурах выше 50—100° С.

Чем бо́льшую сквозную электропроводность имеет стекло, тем при более низкой температуре наблюдается возрастание угла потерь δ.*

На рис. 55 приведены зависимости угла потерь δ от температуры для стекол разного состава с различной электропроводностью.

На рис. 56 показана зависимость угла потерь δ от температуры для трех видов керамики, содержащих различное количество стекло-

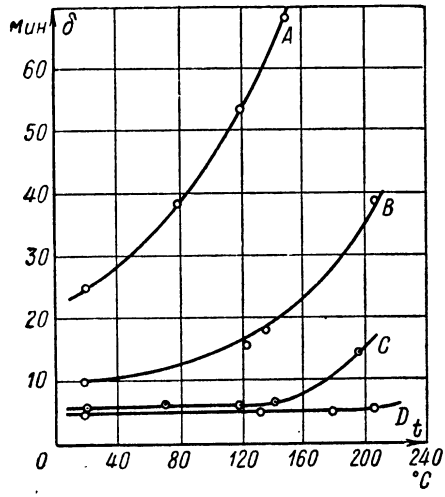


Рис. 55. Зависимость угла диэлектрических потерь от температуры для щелочных стекол при 1 *Мгц*.

A — стекло № 65, $\rho = 10^{13}$ *ом·см*; *B* — пирекс натриевый нормальный, $\rho = 10^{14}$ *ом·см*; *C* — пирекс натриево-калиевый, $\rho = 10^{16}$ *ом·см*; *D* — пирекс калиевый, $\rho = 5 \cdot 10^{16}$ *ом·см*.

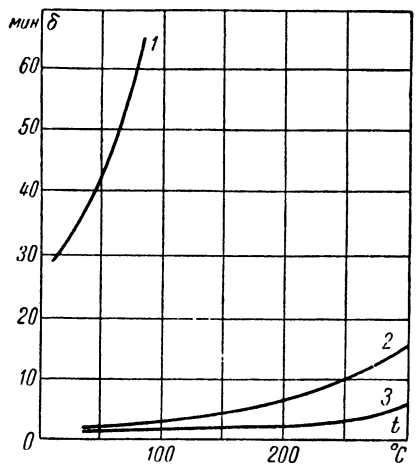


Рис. 56. Зависимость угла диэлектрических потерь установочной керамики от температуры при 1 *Мгц*.

1 — изоляторный фарфор; *2* — ультрафарфор; *3* — алюминоксид.

видной фазы и имеющих разный состав и различную электропроводность.

Главным фактором, определяющим диэлектрические потери в неорганических стеклах, является то или иное сочетание входящих в стекло окислов, поскольку оно влияет на структуру стекла. Наличие в стекле щелочных окислов (Na_2O, K_2O) при отсутствии окислов тяжелых металлов (BaO, PbO) вызывает значительное повышение диэлектрических потерь стекла. Введение тяжелых окислов уменьшает tgδ щелочных стекол. При очень высоких частотах, приближающихся к частотам собственных колебаний ионов, в стеклах возможны также резонансные потери.

Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках повышены по сравнению с обычными диэлектриками. Они рассмотрены в связи с особенностями этих материалов в § 19.

* $\operatorname{tg}\delta \approx 3440\,\delta$, где δ выражено в минутах.

Диэлектрические потери в твердых веществах неоднородной структуры. К твердым веществам этого типа, используемым в качестве диэлектриков в технике, относятся материалы, в состав которых входит не менее двух компонентов, механически смешанных между собой. К неоднородным диэлектрикам относится прежде всего керамика. Любой керамический материал представляет собой сложную многофазную систему. В составе керамики различают кристаллическую фазу, стекловидную фазу и газовую фазу (газы в закрытых порах).

Диэлектрические потери в керамике зависят от характера и количественного соотношения кристаллической и стекловидной фаз. Газовая фаза в керамике вызывает повышение диэлектрических потерь керамики при высоких напряженностях поля вследствие развития ионизации.

Потери в керамике могут быть также увеличены, если в процессе производства в керамическом изделии образуются полупроводящие включения с электронной электропроводностью. Такое же увеличение потерь в керамике происходит за счет адсорбированной влаги при наличии открытой пористости.

К числу неоднородных материалов следует отнести слюду, обладающую слоистой структурой. Наличие полупроводящих прослоек воды в слюде вызывает увеличение $\operatorname{tg}\delta$ при переменном напряжении низкой частоты.

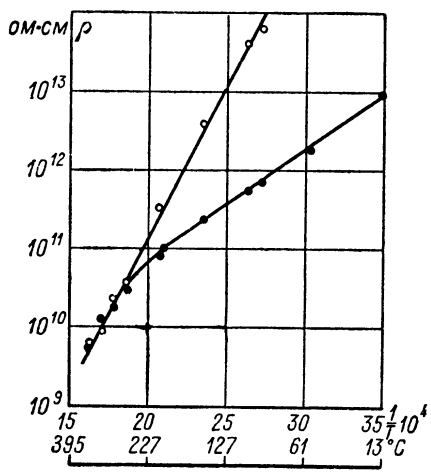


Рис. 57. Зависимость удельного объемного сопротивления слюды мусковита от температуры:

• — ρ — вычисленное по $\operatorname{tg}\delta$ при $f = 50$ *гц*;
○ — ρ — измеренное на постоянном токе.

На рис. 57 показана температурная зависимость удельного объемного электросопротивления слюды-мусковита, измеренного при постоянном токе, и активного удельного электросопротивления, вычисленного по величине $\operatorname{tg}\delta$ при частоте 50 *гц* [выражение (92)]. Как видно из рисунка, значения удельного электросопротивления при постоянном токе и при переменном токе совпадают только при высоких температурах, когда активная проводимость определяется лишь электропроводностью самой слюды.

Пропитанную бумагу следует также отнести к диэлектрикам неоднородной структуры. Такая бумага, кроме волокон целлюлозы, содержит пропитывающее вещество того или другого состава. Диэлектрические потери пропитанной бумаги определяются электрическими свойствами обоих компонентов и их количественным соотношением.

На рис. 58 представлена зависимость tg δ от температуры для бумаги, пропитанной масляно-канифольным компаундом. Кривая имеет два максимума: первый (при низких температурах) характеризует диэлектрические потери самой бумаги (целлюлозы); второй (при более высокой температуре) обусловлен дипольно-релаксационными потерями пропитывающего компаунда.

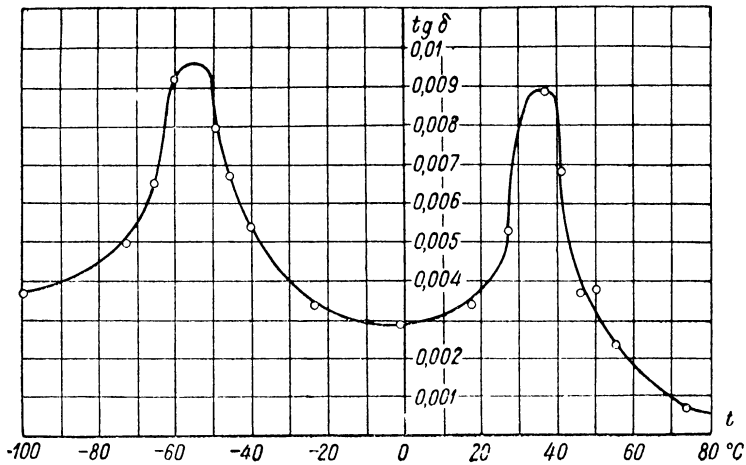


Рис. 58. Зависимость tg δ от температуры для конденсаторной бумаги, пропитанной компаундом (80% канифоли + 20% трансформаторного масла).

К применяемым в радиоэлектронике неоднородным диэлектрикам относятся пластические массы с различными наполнителями, слоистые пластмассы, микалекс; сюда же можно отнести каучуковые материалы с наполнителями.

§ 7. Пробой диэлектриков

Общая характеристика явления пробоя

Каждый диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика, или нарушения его электрической прочности.

Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля — пробивной напряженностью.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах. Пробивная напряженность определяется величиной про-

бивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика в точке пробоя:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \tag{104}$$

где h — толщина диэлектрика, *см* или *мм*.

Соответственно пробивная напряженность выражается в *кв/см* или *кв/мм*.

Пробой газа обусловливается явлением ударной и фотоионизации. В однородном поле пробой газа наступает внезапно, в неоднородном поле пробою предшествует явление короны.

Пробой жидких диэлектриков происходит в результате тепловых и ионизационных процессов. Одним из главнейших факторов, способствующих пробою жидкостей, является наличие посторонних примесей в жидкости.

Пробой твердых тел может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием поля.

Явление электрического пробоя связано с электронными процессами в диэлектрике, возникающими в сильном электрическом поле и приводящими к внезапному резкому местному возрастанию плотности электрического тока к моменту пробоя.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика вплоть до его термического разрушения.

При длительном действии напряжения пробой может быть вызван электрохимическими процессами, происходящими в диэлектрике при воздействии электрического поля.

Пробой газов

Воздух является изоляционной средой, в которой используется разнообразная радиоаппаратура: передатчики, приемники, телевизоры, радиолокаторы и т. д.

В тех случаях, когда аппаратура работает вблизи земной поверхности, следует рассматривать физические процессы в воздухе при нормальном атмосферном давлении; однако для радиоэлектроники актуальным является также изучение свойств воздуха при значительном разрежении и повышенном давлении.

Пробивная напряженность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с большинством жидких и твердых диэлектриков. Пробой воздуха, как и других газов, следует рассматривать как следствие развития процессов ударной и фотоионизации.

Небольшое количество содержащихся в газе положительных и отрицательных ионов и электронов (см. § 5), находящихся, как и нейтральные молекулы газа, в беспорядочном тепловом движении, при наложении поля получает некоторую добавочную скорость и начинает

перемещаться в направлении поля. При этом заряженная частица газа приобретает дополнительную энергию

$$W = qU_{\lambda_{ср}}. \tag{105}$$

где q — заряд;

$U_{\lambda_{ср}}$ — падение напряжения на длине свободного пробега.

Если поле достаточно однородно, то можно положить

$$U_{\lambda_{ср}} = E\lambda_{ср}, \tag{106}$$

где E — напряженность поля;

$\lambda_{ср}$ — среднее расстояние, пройденное заряженной частицей без столкновений, т. е. длина свободного пробега.

Отсюда $$W = Eq\lambda_{ср}. \tag{107}$$

Добавочная энергия зарядов сообщается молекулам, с которыми сталкиваются движущиеся заряды. Если эта энергия достаточно велика, происходит ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы, или их возбуждение, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту.

Условием, определяющим возможность ионизации, является

$$W \geqslant W_и, \tag{108}$$

причем W включает в себя и энергию теплового движения, обычно небольшую при нормальной температуре.

Из формул (107) и (108) имеем:

$$Eq\lambda_{ср} \geqslant W_и. \tag{109}$$

Энергию ионизации $W_и$ обычно характеризуют ионизационным потенциалом:

$$U_и = \frac{W_и}{q}. \tag{110}$$

Ионизационный потенциал различных газов лежит в пределах от 4 до 25 *в*, что соответствует энергии ионизации от 4 до 25 *эв*.

При заданных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной величине напряженности поля, поскольку q и $\lambda_{ср}$ постоянны для каждого газа. Эта напряженность поля E называется начальной напряженностью.

В некоторых газах, например в кислороде, углекислом газе, парах воды, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с ней, превращая ее в электроотрицательный ион. Присоединение, „прилипание“ электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке электронной оболочки молекул, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии нейтральной молекулы на некоторую величину, которую называют энергией сродства к электрону. Она колеблется у разных газов от 0,75 до 4,5 *эв*. В инертных газах — аргоне, неоне, гелии,

криптоне, ксеноне и азоте отрицательные ионы не возникают. При разряде образуются положительные ионы O^+, O_2^+, N^+, N_2^+, NO^+.

Скорость электрона, прошедшего без столкновений разность потенциалов U вольт, определяется по выражению

$$v \approx 600 \sqrt{U} \ [км/сек]. \qquad (111)$$

Подставляя в эту формулу величины ионизационных потенциалов, видим, что электрон ионизирует газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 *км/сек*. Основную ионизацию ведут электроны. Казалось бы, что, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, должны вызывать ионизацию газа. В действительности при энергиях до сотни и тысячи электроновольт соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа. Это различие бомбардировки частиц газа электронами и положительными ионами объясняется тем, что электроны имеют значительно большую подвижность, чем ионы. Кроме того, отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударение с периферическим электроном нейтральной частицы, то условия для отщепления электрона оказываются неблагоприятными, так как при большом различии массы энергия, отдаваемая электрону при упругом ударе, мала.

Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц, поскольку соударения являются элементарным актом химической реакции.

В явлениях разряда положительные ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

В ряде случаев электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее в „возбужденное состояние" — вызвать изменение в движении электронов, связанных с молекулой. В следующий момент эта „возбужденная" молекула отдает свою избыточную энергию в форме излучения — испускает фотон. Фотон поглощается какой-либо другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Такая внутренняя фотонная ионизация газа, благодаря большой скорости распространения излучения, приводит к особо быстрому развитию в разрядном промежутке каналов повышенной электропроводности газа.

На рис. 59 представлена схема, по Мику и Лёбу, поясняющая, почему рост электропроводящего канала — стримера происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. На этом рисунке лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути фотонов. Внутри каждого конуса, изображающего лавину, газ ионизируется ударами электронов; новоотщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые

ими частицы газа, и таким образом лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, направляющихся к катоду. Начала волнистых линий исходят из атомов, которые были „возбуждены" ударом электрона и вслед за тем испустили фотон. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ *м/сек*, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, которое изображено концом волнистой линии, ионизируют частицу газа. Отщепленный здесь электрон, устремляясь к аноду, порождает новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем,

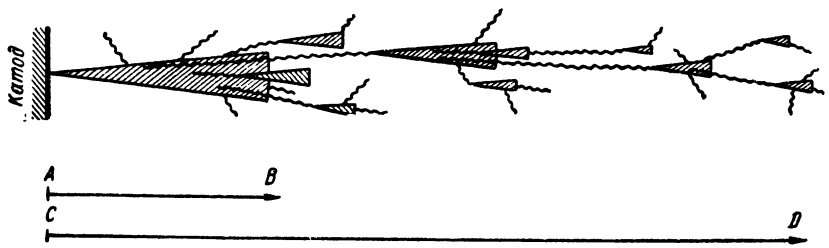


Рис. 59. Схема развития отрицательного стримера.

на величину малой стрелки *AB*, показанной на рис. 59, намечающийся канал повышенной электропроводности газа, т. е. стример, распространяется на величину большой стрелки *СД*, показанной на том же рисунке.

В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленного к катоду.

Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы, возникновение и развитие которого схематически показано на рис. 60. Электронные лавины оставляют на своем пути большое число новообразованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода. Если концентрация положительных ионов здесь достигает определенной величины (близкой к 10^{12} ионам в 1 $см^3$), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотоионизация, во-вторых, электроны, освобождаемые частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера, и, в-третьих, вследствие фотоионизации концентрация положительных ионов на пути стримера увеличивается.

Из рис. 60 видно, что многие электроны вовлекаются в область наибольшей концентрации положительных ионов — в головную часть положительного стримера. Насыщение электронами пространства,

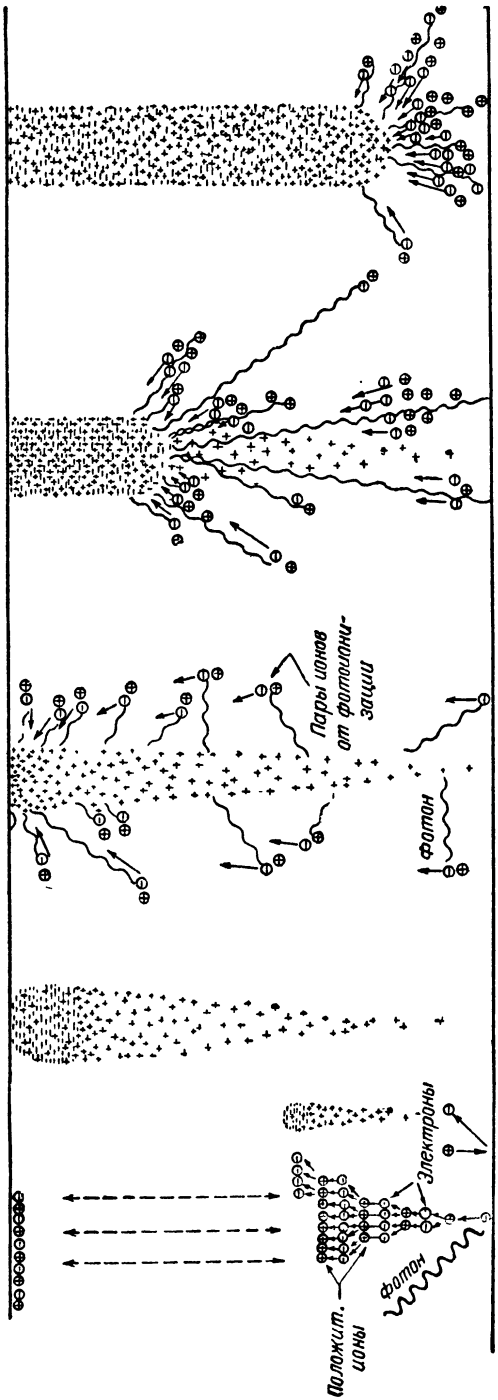


Рис. 60. Схема возникновения и развития положительного стримера.

заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов положительных частиц на катоде возникает катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа совершается практически мгновенно; длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 *см* составляет $10^{-7} - 10^{-8}$ *сек*.

Чем больше величина напряжения, приложенного к газовому промежутку, тем быстрее может развиться пробой. Если длительность

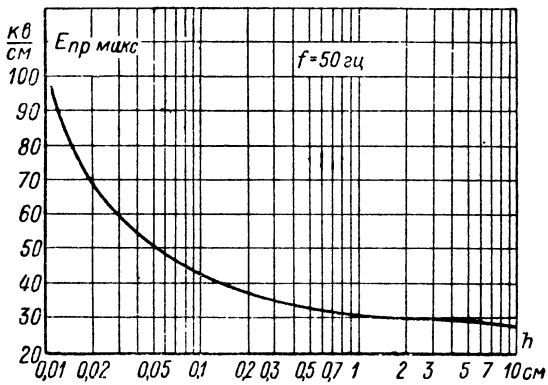


Рис. 61. Зависимость пробивной напряженности от расстояния между электродами для воздуха в случае однородного поля.

воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуют коэффициентом импульса:

$$\beta = \frac{U_{\text{пр.имп}}}{U_{\text{пр}}}, \qquad (112)$$

где $U_{\text{пр.имп}}$ — пробивное напряжение при данном импульсе;
$U_{\text{пр}}$ — пробивное напряжение при постоянном или переменном (частотой 50 *гц*) напряжениях.

Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях может доходить до 1,5.

Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой.

Рассмотрим явление пробоя газа в однородном поле.

Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами большого диаметра при малом расстоянии между ними. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении напряжения строго определенной величины, зависящей от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если

источник напряжения имеет достаточную мощность. Появление искры при известном расстоянии между электродами используют для определения величины приложенного напряжения (измерение высоких напряжений при помощи шаровых разрядников).

Зависимость пробивной напряженности воздуха (амплитудные значения) от расстояния между электродами показана на рис. 61.

При нормальных условиях, т. е. при давлении 760 *мм* рт. ст. и температуре 20° С пробивная напряженность воздуха при расстоянии между электродами в 1 *см* составляет около 32 *кв/см*.

При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение пробивной напряженности. Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между электродами.

В случае переменного напряжения указанные здесь величины пробивных напряженностей относятся к амплитудным значениям и соответствуют пробою при частоте 50 *гц*.

Пробивная напряженность газа в сильной степени зависит от плотности газа, т. е. от давления, если температура постоянна. При больших давлениях и соответственно повышенной плотности газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше; тем самым уменьшается длина свободного пробега электронов, и, как следует из формулы (109), для того чтобы пробой произошел, пробивная напряженность газа должна быть больше. При уменьшении давления вначале наблюдается падение пробивной напряженности, как это видно из рис. 62 (если расстояние между электродами будет неизменным); когда же давление доходит до некоторого предела ниже атмосферного давления, пробивная напряженность начинает снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (холодная эмиссия). В этом случае пробивная напряженность доходит до весьма высоких значений, порядка 10^3 *кв/см*, и зависит от материала и состояния поверхности электродов.

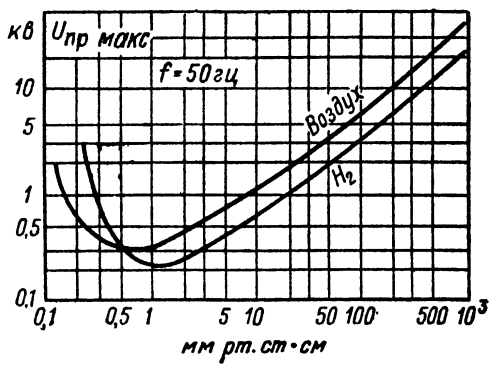


Рис. 62. Зависимость разрядного напряжения от произведения p на межэлектродное расстояние h для воздуха и водорода.

При больших расстояниях между электродами, в условиях высокого вакуума, пробивная напряженность уменьшается по сравнению

с указанным выше предельным значением. Это объясняется нарушением вакуума в связи с возможным выделением из электродов окклюзиро-

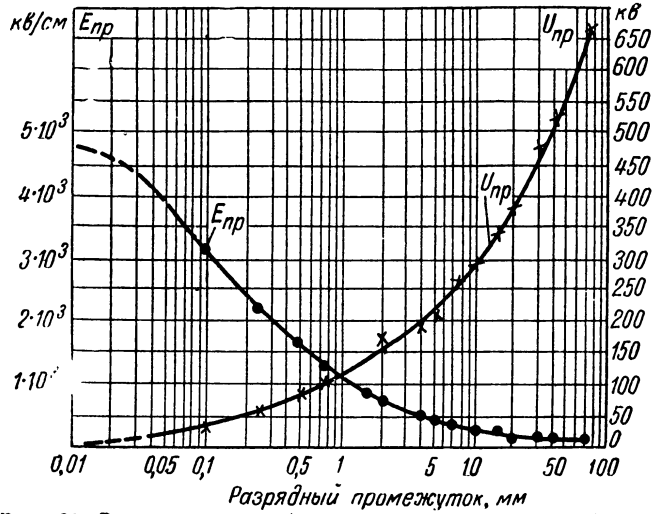


Рис. 63. Зависимость пробивного напряжения и пробивной напряженности электрического поля от расстояния между электродами в высоком вакууме.

ванного в них газа и частичным испарением электродного металла под действием ударов электронов, эмитируемых катодом.

На рис. 63 показана зависимость пробивного напряжения и пробивной напряженности от расстояния между электродами, помещенными в высокий вакуум. Высокую пробивную напряженность вакуума используют в технике при конструировании вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты.

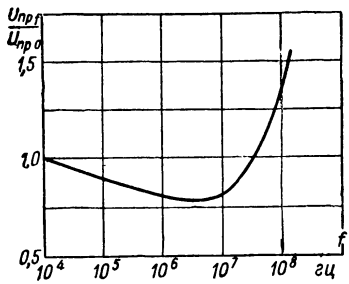


Рис. 64. Отношение величины пробивного напряжения воздуха при заданной частоте к пробивному напряжению при постоянном токе в зависимости от частоты.

На рис. 62 была представлена зависимость пробивного напряжения (начального) от величины произведения давления газа на расстояние между электродами, получившая наименование закона Пашена; следует отметить наличие минимума, отвечающего определенному для данного газа значению произведения $p \cdot h$.

Минимальное значение пробивных напряжений для разных газов лежит в пределах 280—420 *в*. Для воздуха минимальное пробивное напряжение составляет около 300 *в*.

При малых колебаниях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа.

Пробивное напряжение газа в однородном поле меняется в зависимости от частоты, особенно при радиочастотах. На рис. 64 показана зависимость пробивного напряжения воздуха между двумя сферами от частоты приложенного напряжения. По оси ординат отложено отношение пробивного напряжения при данной частоте к пробивному напряжению при постоянном токе. По оси абсцисс отложена частота в логарифмическом масштабе.

При небольших частотах амплитудная величина пробивного напряжения совпадает с пробивным напряжением при постоянном токе; при более высоких частотах пробивное напряжение несколько уменьшается и достигает минимума при частоте около $5 \cdot 10^6$ *гц*, после чего вновь возрастает и достигает значений, превосходящих пробивное напряжение при постоянном токе более чем в 1,5 раза. Уменьшение пробивного напряжения с ростом частоты объясняется искажением поля, обусловленным образованием объемных зарядов в газе, вследствие различной подвижности положительных ионов и электронов.

Таблица 20

Пробивное напряжение газов разного состава в сравнении с пробивным напряжением воздуха при температуре 20° С **и давлении** 760 *мм* рт. ст.

Наименование газа	Химический состав	Отношение пробивного напряжения газа к пробивному напряжению воздуха
Углекислота	CO_2	0,9
Азот	N_2	1,0
Гексафторид серы (элегаз)	SF_6	2,5
Дихлордифторметан (фреон)	CCl_2F_2	2,6
Пары хлороформа	$CHCl_3$	4,2
Пары четыреххлористого углерода	CCl_4	6,4

Дальнейшее повышение пробивных напряжений при ультракоротких волнах объясняется тем, что продолжительность полупериода изменения напряжения у. к. в. настолько мала, что развитие и завершение процесса ударной ионизации сильно затруднены.

Химический состав газа заметно влияет на величину электрической прочности; это иллюстрирует табл. 20, в которой пробивные напряжения некоторых газов сравниваются с пробивным напряжением воздуха.

Некоторые из этих газов находят применение в технике; например, элегаз используют для наполнения высоковольтных высокочастотных конденсаторов.

Закономерности, которым подчиняется пробой газов в неоднородном поле, заметно отличаются от описанных выше закономерностей, наблюдаемых при пробое в однородном поле. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, прово-

дами или электродами антенн передатчиков, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем радиус сферы, и т. д.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде короны в местах, где напряженность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения.

В случае несимметричных электродов игла — плоскость и положительной полярности на игле пробой происходит при меньшем

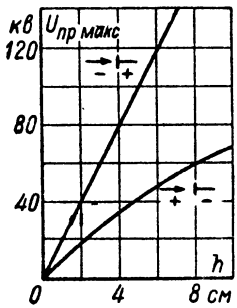


Рис. 65. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле.

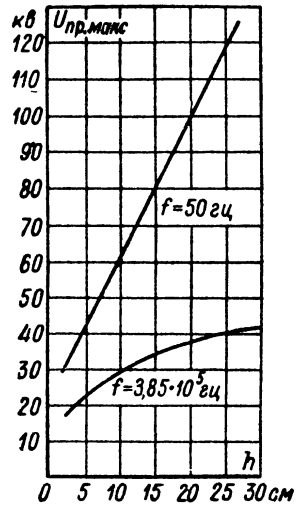


Рис. 66. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами при разных частотах. Электроды: игла — плоскость.

напряжении, чем при обратной полярности (рис. 65). Это объясняется образованием у иглы положительного объемного заряда, содействующего развитию пробоя при положительной полярности иглы.

Пробой газа при высоких частотах в неоднородном поле (в отличие от пробоя в однородном поле) происходит при значительно более низких значениях напряжения, чем при постоянном напряжении или напряжении технической частоты. При высоких частотах напряжения, соответствующие появлению короны, почти совпадают с пробивными напряжениями. В этом случае пробивное напряжение мало возрастает с увеличением расстояния между электродами.

Сравнение пробивного напряжения воздуха в резко неоднородном поле при низкой и высокой частотах дано на рис. 66.

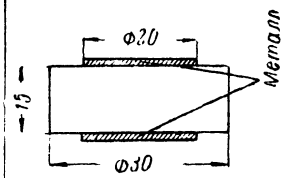
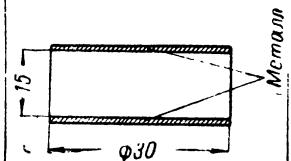
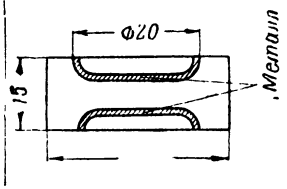
Пробой воздуха у поверхности твердого диэлектрика, называемый в технике поверхностным перекрытием, возникает обычно при более низких напряжениях, чем в том случае, когда между электродами имеется только воздух. На величину разрядного напряжения

оказывает влияние форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов и диэлектрика, частота напряжения, состояние поверхности диэлектрика, давление воздуха.

Влияние конфигурации поля на величину разрядного напряжения показано в табл. 21.

Таблица 21

Напряжение поверхностного разряда при технической и высокой частотах и разных конфигурациях поля

№ пп.	Конфигурация поля	$f = 50$ *гц*		$f = 10^6$ *гц*	
		Напряжение короны, *кв*	Разрядное напряжение, *кв*	Напряжение короны, *кв*	Разрядное напряжение, *кв*
1		3—4	20	2—3	3—4
2		5—6	8—9	—	6—7
3		—	20—25	—	15—20

Относительная влажность воздуха сильно влияет на величину разрядных напряжений изоляторов при промышленной частоте и постоянном напряжении и мало сказывается при радиочастотах. При промышленной частоте повышение относительной влажности воздуха с 60 до 80—90% снижает разрядные напряжения почти вдвое в случае керамического образца № 3, указанного в табл. 21.

Пробой жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики отличаются значительно более высокими пробивными напряжениями, чем газы в нормальных условиях.

Предельно чистые жидкости получить чрезвычайно трудно. Постоянными примесями в жидкости являются вода, газы и мельчайшие механические частички. Наличие примесей сильно осложняет явление пробоя жидких диэлектриков и вызывает большие затруднения для создания точной теории пробоя этих веществ. Для объяснения механизма пробоя жидкостей предложено несколько теорий.

Тепловая теория связывает пробой технических диэлектриков с частичным перегревом жидкости и вскипанием ее в местах наибольшего количества примесей, приводящим к образованию газового мостика между электродами.

Для жидкостей, максимально очищенных от примесей, пытались применить теорию ионизационного пробоя, как и для случая газов. При этом повышенную электрическую прочность жидкого диэлектрика по сравнению с газообразным легко объяснить резко уменьшенным значением длины свободного пробега электронов.

Теория чисто электрического пробоя жидких диэлектриков связывает явление пробоя с вырыванием электронов из металлических электродов или с разрушением самих молекул жидкости.

Опыт свидетельствует о резком влиянии примесей на электрическую прочность жидкого диэлектрика. Влияние примесей в меньшей степени сказывается при пробое жидких диэлектриков импульсами.

Импульсная прочность загрязненных жидких диэлектриков в пять-семь раз выше электрической прочности при длительном воздействии напряжения. Для очищенных жидкостей эта зависимость выражается в меньшей степени и разница в значениях пробивных напряжений не превышает трех раз.

Пробой жидкости при радиочастотах связан с ее разогревом за счет диэлектрических потерь, что может приводить к термическому разрушению жидкости. Этим объясняется необходимость установления пониженных рабочих значений напряженности поля для жидких диэлектриков при радиочастотах по сравнению с промышленной частотой.

Пробой твердых диэлектриков

Различают четыре вида пробоя твердых диэлектриков:

1) электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков;

2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;

3) тепловой пробой;

4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных механизмов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости: от характера электрического поля — постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты; наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор; условий охлаждения; времени воздействия напряжения.

Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков. Этот вид пробоя характеризуется весьма быстрым развитием,

он протекает за время не более 10^{-7}—10^{-8} *сек*, не обусловлен тепловой энергией, хотя величина электрической прочности при электрическом пробое в некоторой степени зависит от температуры и сопровождается в своей начальной стадии разрушением диэлектрика в очень узком канале.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электроннная лавина. Согласно современным представлениям эти электроны рассеивают энергию своего движения, накопленную в электрическом поле, за счет возбуждения упругих колебаний кристаллической решетки. Электроны, достигшие определенной критической скорости, производят отщепление новых электронов, и стационарное состояние нарушается, т. е. возникает ударная ионизация электронами в твердом теле.

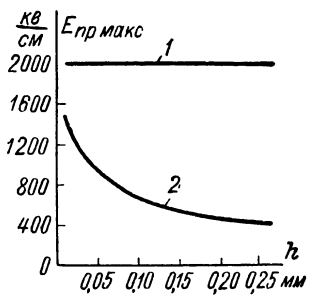


Рис. 67. Зависимость пробивной напряженности от толщины для стекла:

1— однородное поле; *2*— неоднородное поле.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние проводимости и диэлектрических потерь, обусловливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. В случае однородного поля и полной однородности структуры материала пробивные напряжения при электрическом пробое могут служить мерой электрической прочности вещества как такового. Такие условия удается наблюдать для монокристаллов щелочно-галоидных соединений и некоторых органических полимеров. В этом случае $E_{пр}$ достигает более $10 \cdot 10^3$ *кв/см*.

Для однородных материалов наблюдается заметная разница в значениях пробивной напряженности в однородном и неоднородном полях, как это видно из рис. 67.

Электрический пробой неоднородных диэлектриков. Такой пробой характерен для технических диэлектриков, которые в подавляющем большинстве случаев содержат газовые включения. Так же как и электрический пробой однородного диэлектрика, он отличается весьма быстрым развитием. Поэтому наблюдающееся в ряде случаев необратимое изменение свойств диэлектрика, его старение, требующее длительного времени, следует рассматривать как начало химической формы пробоя.

Пробивные напряженности для неоднородных диэлектриков, наблюдающиеся во внешнем однородном поле, как правило, невысоки и мало отличаются друг от друга (рис. 68).

Принято считать, что в однородном поле пробивные напряженности стекол, фарфора и ряда других твердых диэлектриков не зависят от толщины образца. Однако основные работы по изучению

влияния степени однородности поля на электрическую прочность проводились лишь со стеклом при очень малых толщинах образцов от 0,05 до 0,2—0,5 *мм*, когда число дефектов невелико. Данные рис. 68 показывают, что для радиокерамики с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает количество слабых мест, газовых включений и существенно снижаются пробивные напряженности как в однородном, так и в неоднородном полях.

Иногда на опыте можно наблюдать, что пробивная напряженность керамики при электродах, создающих внешнее неоднородное поле,

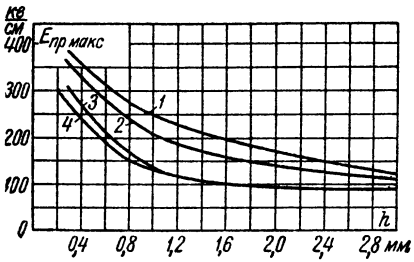


Рис. 68. Зависимость пробивной напряженности радиокерамики от толщины образца при частоте 50 *гц*:

1— ультрафарфор, однородное поле; *2*— ультрафарфор, неоднородное поле; *3*— тиконд, однородное поле; *4* — тиконд, неоднородное поле.

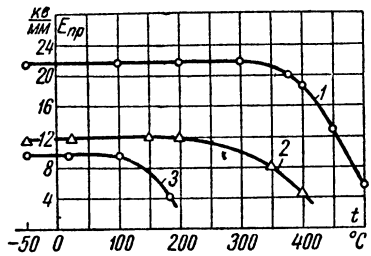


Рис. 69. Зависимость пробивной напряженности при постоянном напряжении от температуры для образцов из керамических материалов.

1 — Ш-15 (шпинелевая керамика $MgO \cdot Al_2O_3$); *2*— Т-150 (титаносодержащая керамика $CaTiO_3$); *3* — керамика на основе титаната бария.

будет даже выше, чем при электродах, обеспечивающих однородное поле. Так, пробивная напряженность образцов рутиловой керамики толщиной 1,6—1,7 *мм* при постоянном напряжении в случае электродов игла — плоскость составляет около 240 *кв/см*, а при плоских электродах — всего 125—150 *кв/см*.

Из этого следует, что чем меньше площадь электродов, тем может быть выше значение пробивной напряженности керамических материалов, вследствие уменьшения количества слабых мест, хотя в этом случае имеет место резко неоднородное электрическое поле.

Пробивная напряженность твердых неоднородных диэлектриков, например, радиокерамики, практически не зависит от температуры в широком диапазоне. Заметное снижение пробивной напряженности различных видов радиокерамики наблюдается лишь при температурах 200—400° С (рис. 69). Такая закономерность говориг о появлении при этих температурах механизма теплового пробоя. У титаната бария, имеющего низкую пробивную напряженность, снижение ее происходит при более низких температурах.

Резкое уменьшение электрической прочности керамики при толщинах стенки образцов 1,5 *мм* и более становится очень заметным при высоких частотах. Рабочие градиенты в этом случае составляют

всего 10—20 *кв/см*, причем ограничиваются они не тепловым пробоем. Применение принудительного охлаждения (водяного) для мощных высокочастотных конденсаторов, повышающее реактивную мощность по нагреву в 10—15 раз, не позволяет все же увеличивать рабочие напряженности на керамический диэлектрик.

При некачественном технологическом процессе изготовления керамических изделий, когда в материале имеются крупные закрытые поры (диаметром до 0,5—1,0 *мм*), разрушение керамики в поле высокой частоты имеет особый характер. В этом случае пробой обусловливается механическими напряжениями, возникающими между сильно нагретыми за счет ионизационных потерь стенками закрытой поры и менее нагретым объемом диэлектрика. По достижении термомеханическими напряжениями величин, превосходящих предел прочности материала, диэлектрик разрывается, растрескивается. Перед пробоем часто наблюдаются отдельные точечные свечения, связанные с ионизацией газовых включений.

Электрохимический пробой. Электрохимический пробой радиотехнических материалов имеет особо существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжениях низкой частоты, когда в материале развиваются электролитические процессы, обусловливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции (электрохимическое старение). Кроме того, электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением, например, в керамике окислов металлов переменной валентности.

Электрохимический пробой требует для своего развития длительного времени, поскольку он связан с явлением электропроводности, возможные механизмы которой были рассмотрены в § 5. В керамике, содержащей окислы металлов переменной валентности (например TiO_2), электрохимический пробой встречается значительно чаще, чем в керамике, состоящей из окислов алюминия, кремния, магния, бария.

Наличие щелочных окислов в алюмосиликатной керамике способствует возникновению электрохимического пробоя и ограничивает допустимую рабочую температуру. При электрохимическом пробое, наблюдаемом при постоянном напряжении и низких частотах в условиях повышенных температур или высокой влажности воздуха, большое значение имеет материал электрода. Как уже отмечалось, серебро, способное диффундировать в керамику, облегчает электрохимический пробой, в противоположность, например, золоту.

Тепловой пробой. Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество тепла, выделяющегося в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество тепла, которое может рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие, и процесс приобретает лавинообразный характер.

Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению, растрескиванию, обугливанию и пр. Величина пробивной напряженности при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия, в противоположность электрическому и ионизационному пробою, где пробивная напряженность может служить характеристикой материала с точки зрения электрической прочности. Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды и др. Кроме того, „электротепловое пробивное напряжение" зависит от теплостойкости материала; органические диэлектрики (например полистирол) имеют более низкие значения электротепловых пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика), при прочих равных условиях, хотя бы только вследствие их малой теплостойкости.

Как было показано на рис. 69, пробивная напряженность при тепловом пробое уменьшается с ростом температуры.

Температура нагрева изолятора, помещенного в поле высокого напряжения, устанавливается, когда тепловыделение становится равным теплоотдаче в окружающую среду. В большинстве случаев теплоотвод обусловливается конвекцией воздуха. Таковы условия работы подвесных, опорных изоляторов, плат воздушных конденсаторов, керамических конденсаторов, каркасов катушек индуктивности, крестовин и т. д. Теплоотвод за счет теплопроводности окружающей среды имеет место для кабелей, вмонтированных в стены вводов, мачто-опорных изоляторов.

Обычно расчет изоляторов имеет в виду установить рабочее напряжение, которое можно приложить к изделию, причем температура нагрева не должна превосходить некоторой заданной величины.

Известно, что с увеличением приложенного напряжения возрастает реактивная мощность, что при данном $\operatorname{tg}\delta$ вызывает рост тепловыделения и возрастание нагрева изолятора.

Для того чтобы температура изолятора не превышала некоторого критического значения, выше которого неизбежно наступает тепловое разрушение изолятора, необходимо правильно установить допустимое напряжение. Если считать, что весь теплоперепад происходит вне диэлектрика, то рабочее напряжение можно найти, приравняв тепловыделение количеству отводимого тепла, при заданной температуре поверхности изолятора:

$$P_x \operatorname{tg}\delta = U^2\omega C \operatorname{tg}\delta = \sigma S(t_{\text{раб}} - t_0), \qquad (113)$$

где U — напряжение, *в*;
P_x — реактивная мощность, *ва*;
ω — угловая частота;
C — емкость изолятора, *ф*;
$\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь при рабочей температуре;
σ — коэффициент теплоотдачи, *вт/см²·град*;

S — поверхность изолятора, $см^2$;
$t_{раб}$ и $t_о$ — температуры поверхности изолятора и окружающей среды, °С.

Формула (113) позволяет с достаточной точностью рассчитать допустимое напряжение для изделий с известной электрической емкостью и хорошей теплопроводностью диэлектрика, обеспечивающей малый перепад температуры по сечению изделия, например, для керамических конденсаторов.

Кривая *1* на рис. 70 представляет собой зависимость активной мощности P_a, выделяющейся в изоляторе за счет диэлектрических потерь, от температуры; форма кривой определяется соответствующей зависимостью tg δ. Эту кривую можно рассматривать как зависимость $\operatorname{tg}\delta = F(t)$ в масштабе реактивной мощности изолятора при данном напряжении и частоте. Такое положение является справедливым, если считать, что диэлектрическая проницаемость материала или, точнее, емкость изолятора не изменяется с температурой, что можно принять для практических расчетов.

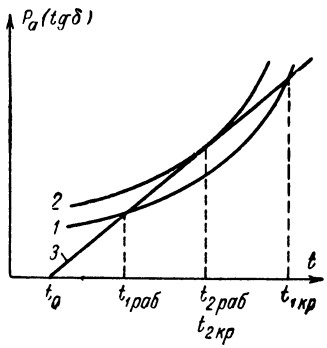


Рис. 70. Кривые тепловыделения и температура изолятора при различных значениях реактивной мощности.

Кривая *1* получена при $P_{x_1} = U_1^2 \omega C$; кривая *2* получена при $P_{x_2} = U_2^2 \omega C$ $\Big\}$ $U_1 < U_2$.

Прямая *3* представляет зависимость теплоотдачи с поверхности изолятора от температуры. Тангенс угла наклона этой прямой равен произведению поверхности изолятора на коэффициент теплоотдачи. Прямая *3* пересекает ось абсцисс в точке, соответствующей температуре окружающей среды $t_о$.

В общем случае кривая *1* имеет две точки пересечения с прямой *3*: при так называемой рабочей температуре ($t_{раб}$) и температуре критической ($t_{кр}$). Диэлектрик, находящийся при определенном напряжении, нагревается за счет диэлектрических потерь; окончательно установившаяся температура его нагрева должна соответствовать $t_{раб}$. Однако в условиях использования изолятора возможен дополнительный нагрев диэлектрика за счет постороннего случайного источника тепла, например солнечных лучей и т. п.

Если нагрев за счет посторонних источников тепла увеличит температуру изолятора выше критической ($t_{кр}$), то, как видно из рис. 70, tgδ диэлектрика настолько увеличивается, что выделяемая мощность превысит отводимое количество тепла. Температура изолятора начнет возрастать вплоть до полного разрушения его.

Разность температур между $t_{кр}$ и $t_{раб}$ указывает на допустимый перегрев изолятора по отношению к рабочей температуре за счет внешних источников тепла. Качество различных изоляторов будет тем выше, чем больше разность $t_{кр} - t_{раб}$ при прочих равных условиях,

На рис. 70 представлены кривые выделения тепла в изоляторах при разных напряжениях, отвечающих определенному запасу прочности по тепловому пробою (кривая *1*) и на пороге предельной прочности (кривая *2*).

По кривой *1* и формуле (113) можно рассчитать допустимое рабочее напряжение

$$U_{раб} = \sqrt{\frac{\sigma S (t_1 - t_0)}{\omega C \operatorname{tg} \delta_1}}, \qquad (114)$$

где $\operatorname{tg} \delta_1$ соответствует значению $\operatorname{tg} \delta$ при $t_{раб} = t_1$.

По кривой *2* и формуле (113) может быть рассчитано пробивное напряжение изолятора. В данном случае критическая температура совпадает с рабочей и напряжение на изоляторе должно рассматриваться как критическое, т. е. пробивное:

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{\sigma S (t_2 - t_0)}{\omega C \operatorname{tg} \delta_2}}, \qquad (115)$$

где значение $\operatorname{tg} \delta_2$ соответствует значению $\operatorname{tg} \delta$ при критической температуре $t_{кр} = t_2$.

Для того чтобы определить эту температуру, надо из точки на оси абсцисс, соответствующей температуре t_0, провести касательную к кривой температурной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ и найти температуру, соответствующую точке касания.

Изложенные выше закономерности оказываются справедливыми, если считать, что температура, а следовательно, и $\operatorname{tg} \delta$ во всех точках изолятора одинаковы. Этому условию хорошо удовлетворяют неорганические материалы: керамика и микалекс, применяемые в высоковольтных высокочастотных устройствах и отличающиеся сравнительно высокой теплопроводностью и низкими диэлектрическими потерями. Если изолятор имеет значительную толщину, а теплопроводность и теплостойкость его малы, например в случае органического диэлектрика, то становится необходимым знать перегрев внутренних слоев изолятора по сравнению с его поверхностью.

Тепловое равновесие изоляторов может быть найдено в каждом отдельном случае с учетом теплоперепада по толщине. Для этого рассчитывают или экспериментально определяют емкость изолятора, после чего, учитывая температурную зависимость $\operatorname{tg} \delta$, графо-аналитически решают поставленную задачу.

Аналитическое выражение для пробивного напряжения в случае теплового пробоя дано В. А. Фоком и Н. Н. Семеновым. Они исходили из одномерного случая теплового пробоя при постоянном и переменном напряжениях. Формулы, предложенные авторами, имеют в виду простейшие конфигурации изделий, в частности тонкие пластины или полые цилиндры с большим отношением длины к диаметру (при радиальном поле). При этом предполагается, что электроды охватывают

всю площадь, нормальную к потоку тепла, а диэлектрические потери возрастают с температурой по экспоненциальной зависимости

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 e^{\alpha(t-t_0)}. \tag{116}$$

Пробивное напряжение определяется следующей формулой:

$$U_{\text{пр}} = 2E_{\text{пр}}h = \sqrt{\frac{8\lambda_{\text{т}}}{\alpha\gamma_0}} \cdot \frac{\beta_0}{\operatorname{ch}\beta_0} e^{\frac{\beta_0 \operatorname{th}\beta_0}{c}}, \tag{117}$$

где h — половина толщины диэлектрика;

$\lambda_{\text{т}}$ — коэффициент теплопроводности диэлектрика;

γ_0 — удельная электропроводность диэлектрика при температуре окружающей среды;

α — постоянная, характеризующая рост проводимости диэлектрика с температурой;

β_0 — значение параметра β, соответствующее пробою.

При выводе уравнения (117) символом β было обозначено выражение:

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha\gamma_0}{2\lambda_{\text{т}}}}\, Ehe^{\frac{\alpha}{2}(t_m - t_0)}, \tag{118}$$

где t_m — температура в среднем слое диэлектрика;

t_0 — температура окружающей среды.

Теория В. А. Фока устанавливает, что значение β_0 находится в сложной зависимости от одной только переменной c, а именно:

$$c = \frac{\beta_0^2 + \beta_0 \operatorname{sh}\beta_0 \operatorname{ch}\beta_0}{(1 - \beta_0 \operatorname{th}\beta_0)\operatorname{ch}\beta_0}. \tag{119}$$

Для плоских образцов эта переменная равна:

$$c = \frac{\lambda_{\text{т},1}\, \sigma\, h}{\lambda_{\text{т}}(\lambda_{\text{т},1} + \sigma l)}, \tag{120}$$

где $\lambda_{\text{т},1}$ — коэффициент теплопроводности электродов;

σ — коэффициент теплоотдачи в электроды;

l — толщина электрода.

Формула (117) может быть представлена в более простом виде, если выражение, стоящее после корня, обозначить $\varphi(c)$ и произвести преобразования.

Тогда

$$U_{\text{пр. эфф}} = 7{,}78\sqrt{\frac{\lambda_{\text{т}}}{\alpha\varepsilon' f \operatorname{tg}\delta_0}} \cdot 10^6 \varphi(c)\ [в], \tag{121}$$

где f — частота; значения ε' и $\operatorname{tg}\delta_0$ соответствуют температуре окружающей среды.

При расчетах по значениям коэффициентов теплопроводности диэлектрика и электродов $\lambda_{\text{т}}$ и $\lambda_{\text{т},1}$ [*кал/сек·см·град*], коэффициенту теплоотдачи σ [*кал/сек·см²·град*], значениям h (половина

толщины диэлектрика) и l [*см*] определяют величину c, по которой, пользуясь графиком рис. 71, находят $\varphi(c)$. Подставляя все величины в формулу (121), находят $U_{\text{пр. эфф}}$ в вольтах.

Расчеты по приведенной формуле (121) далеко не всегда дают значения пробивного напряжения, совпадающего с полученным на

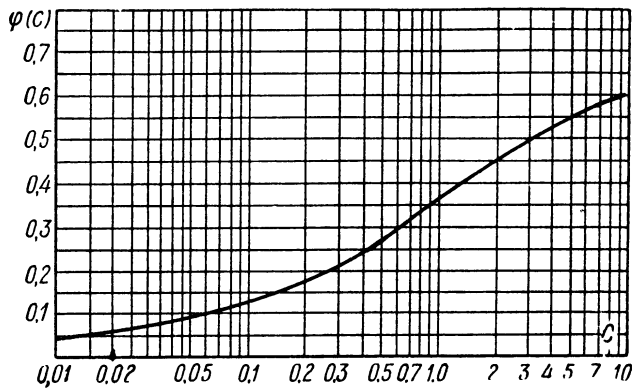


Рис. 71. Значение $\varphi(c)$ к расчету теплового пробоя по В. А. Фоку.

опыте, так как сделанные допущения могут отличаться от условий, имеющих место на практике, например $\operatorname{tg}\delta$ может меняться не обязательно по закону экспоненты с постоянным коэффициентом α, коэффициент теплопередачи σ также не постоянен и зависит от многих факторов. Все это говорит о том, что аналитический метод теплового расчета в ряде случаев не может отобразить сложные закономерности, определяющие процессы выделения тепла в диэлектрике и рассеяния его в окружающую среду.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

При выборе изоляционного материала для изготовления деталей радиоаппаратуры приходится обращать внимание не только на его электрические свойства в нормальных условиях, но рассматривать их стабильность под воздействием влажности окружающего воздуха, повышенных температур, мороза и радиоактивных излучений.

Нормальное использование изделия в большой степени зависит от механических свойств материалов, их прочности на растяжение, сжатие, изгиб, удар, твердости или эластичности. В ряде случаев к изделиям, а следовательно, в известной мере и к материалам, предъ-

являются требования вибропрочности при различных амплитудах и частотах колебаний. Для деталей, в которых имеется сопряжение разных материалов, большое значение имеют температурные коэффициенты линейного расширения.

Разработка технологических процессов изготовления радиоаппаратуры также требует знания физических, механических и химических свойств (например окисляемости, растворимости, склеиваемости) материалов. Срок службы изделий в тропических условиях зависит и от надежности химической защиты материалов против гнилостных бактерий, насекомых и образования плесени.

§ 8. Гигроскопичность и влагопроницаемость диэлектриков

Электроизоляционные материалы в большей или меньшей степени гигроскопичны, т. е. обладают способностью впитывать в себя влагу из окружающей среды, и влагопроницаемы, т. е. способны пропускать сквозь себя водяной пар.

Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара.

Абсолютную влажность воздуха оценивают массой (m) водяного пара, содержащейся в единице объема воздуха — 1 $м^3$.

На рис. 72 приведена абсолютная влажность воздуха при насыщении ($m_{макс}$) в зависимости от температуры. Большего количества воды при всех указанных температурах воздух содержать не может, и она выпадает в виде росы. Из рисунка видно, что абсолютная влажность, необходимая для насыщения воздуха, резко возрастает с увеличением температуры, т. е. растет и давление водяных паров. Для ориентировочных расчетов давление водяных паров (в $кГ/см^2$) можно находить по выражению

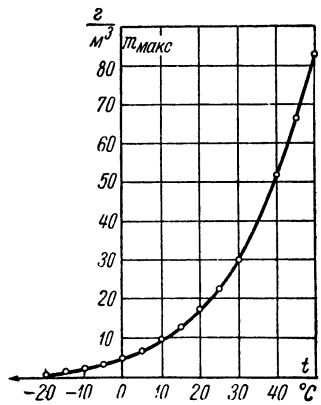


Рис. 72. Зависимость абсолютной влажности воздуха при насыщении от температуры.

$$p = \left(\frac{t}{100}\right)^4, \qquad (122)$$

где t — температура, °С.

Относительной влажностью воздуха называют отношение:

$$\varphi_в = \frac{m}{m_{макс}} \cdot 100\ \%. \qquad (123)$$

Нормальными условиями считают влажность 60—70 % при температуре воздуха $20 \pm 5°$ С.

Как показано в § 4 и 6, вода является сильно дипольным диэлектриком с низким удельным электросопротивлением порядка $10^5 - 10^6$ *ом·см*, а поэтому попадание ее в поры твердых диэлектриков ведет к резкому снижению их электрических свойств. Особенно заметное воздействие влажности наблюдается при повышенных температурах 30—40° С и высоких значениях $\psi_в$, близких к 98—100%. Подобные условия наблюдаются в странах тропического пояса, причем в период дождей они могут держаться в течение длительного периода времени,

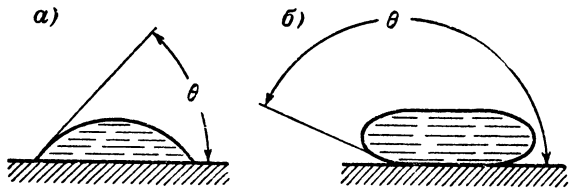


Рис. 73. Углы смачивания поверхностей твердых тел.
а — смачиваемая поверхность; *б* — несмачиваемая поверхность.

что особенно тяжело сказывается при эксплуатации радиоаппаратуры. В первую очередь воздействие повышенной влажности воздуха отражается на поверхностном сопротивлении диэлектриков, что было рассмотрено в § 5. Однако с поверхности диэлектрика влага наиболее легко удаляется. Для предохранения поверхности изоляционных деталей из полярных твердых диэлектриков от действия влажности их покрывают несмачивающимися водой лаками.

Способность твердой лаковой пленки смачиваться водой (или другой жидкостью) характеризуется „краевым углом смачивания" θ капли воды, нанесенной на плоскую поверхность тела (рис. 73). Чем меньше θ, тем сильнее смачивание; для смачиваемых поверхностей $\theta < 90°$, для несмачиваемых $\theta > 90°$.

При наличии в диэлектрике объемной открытой пористости влага попадает и внутрь материала.

Влажность материалов. Образец электроизоляционного материала, помещенный в определенные условия влажности и температуры окружающей среды, через неограниченно большое время достигает некоторого „равновесного" состояния влажности. Если сравнительно сухой образец материала будет помещен во влажный воздух (с относительной влажностью $\psi_в$), то мы будем наблюдать постепенное поглощение материалом влаги из воздуха, причем влажность материала ψ, т. е. содержание влаги на единицу веса материала, в течение времени τ будет повышаться, асимптотически приближаясь к равновесной влажности $\psi_р$, соответствующей данному значению $\psi_в$ (рис. 74, кривая *а*). Наоборот, если в воздухе той же относительной влажности $\psi_в$ будет помещен образец того же материала с начальной влажностью, большей $\psi_в$, то влажность образца будет уменьшаться, асимптотически

приближаясь к значению равновесной влажности $\psi_р$; в этом случае происходит с у ш к а материала (кривая *б*).

Для различных материалов значения равновесной влажности при одном и том же значении относительной влажности воздуха $\psi_в$ могут быть весьма различны. Это иллюстрирует рис. 75.

Определение влажности электроизоляционных материалов весьма важно для уточнения условий, при которых производится испытание

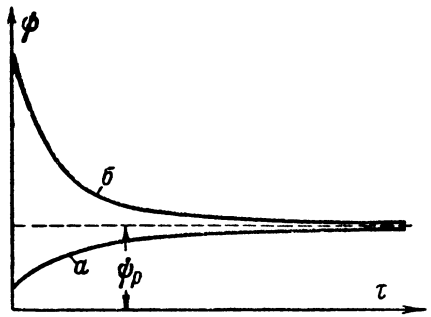


Рис. 74. Изменение влажности ψ образца материала при увлажнении (*а*) и сушке (*б*) при постоянных значениях относительной влажности окружающего воздуха и температуры.

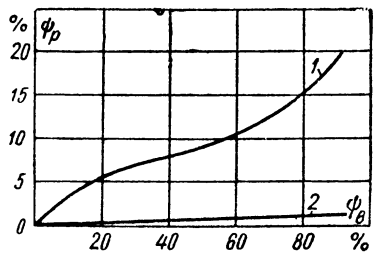


Рис. 75. Зависимость равновесной влажности $\psi_р$ [%] от относительной влажности окружающего воздуха $\psi_в$ [%] для различных материалов.

1 — полярный диэлектрик; *2* — нейтральный диэлектрик.

электрических свойств данного материала. Кроме того, для заметно гигроскопичных материалов, приемка и сдача которых происходят по весу, определение влажности весьма важно для строгого учета количества материала. Для текстильных и тому подобных материалов устанавливается так называемая к о н д и ц и о н н а я в л а ж н о с т ь, соответствующая равновесной влажности материала при нахождении его в воздухе в нормальных условиях; так, для кабельной бумаги кондиционная влажность принимается равной 8%.

На гигроскопичность материала существенное влияние оказывают строение и химическая природа. Большую роль играют наличие и размер капиллярных промежутков внутри материала, в которые проникает влага. Сильно пористые материалы, в частности волокнистые, более гигроскопичны, чем материалы плотного строения.

В табл. 22 приведены ориентировочные размеры пор, встречающихся в различных электроизоляционных материалах, и для сравнения указан эффективный диаметр молекул воды.

Из таблицы видно, что маленькие по размерам молекулы воды могут проникать даже во внутримолекулярную пористость изоляционных материалов.

Определение гигроскопичности по увеличению веса увлажняемого образца хотя и дает некоторое представление о способности мате-

Таблица 22

Ориентировочные размеры пор изоляционных материалов

Характер пористости	Размер, Å	Примечания
Макропоры в керамике	$10^3 \div 10^6$	
Капилляры в волокнах целлюлозы . .	1000	Размер молекулы воды $\sim 2{,}7$ Å
Поры в стенках волокна	$10 \div 100$	
Межмолекулярная пористость различных материалов	$10 \div 50$	
Внутримолекулярная пористость . . .	до 10	

риала поглощать влагу, но не полностью отражает степень изменения электрических свойств этого материала при увлажнении. В том случае, когда поглощенная влага способна образовать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), уже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к чрезвычайно резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой, малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

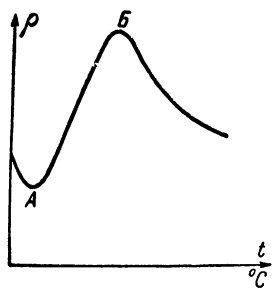


Рис. 76. Зависимость удельного объемного электросопротивления от температуры влажного образца материала, содержащего электролитические примеси.

Наиболее заметное снижение удельного объемного электросопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, содержащих растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой электропроводностью. Для подобных материалов получается интересная зависимость ρ влажного образца от температуры, показанная на рис. 76. При нагревании влажного образца вначале ρ падает за счет увеличения степени диссоциации примесей в водном растворе (до точки *А*), затем идет удаление влаги — сушка (участок *АБ*) и только при более высоких температурах наблюдается снижение ρ от температуры по законам, приведенным в § 5. При переменном напряжении наиболее чувствительной к увлажнению характеристикой диэлектриков является $\mathrm{tg}\delta$, который заметно возрастает при увлажнении материала. Менее чувствительной является величина ε', однако и она, как правило, увеличивается с ростом поглощения влаги, ввиду большого значения $\varepsilon'_{H_2O} \approx 80$ по сравнению с другими диэлектриками. Поэтому в ряде случаев о гигроскопичности материала судят по увеличению электроемкости образца под действием влажности.

Влагопроницаемость. Кроме гигроскопичности, большое практическое значение имеет влагопроницаемость электроизоляционных материалов, т. е. способность их пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки качества материалов для защитных покровов (шланги кабелей, опрессовка конденсаторов, компаундные заливки, лаковые покрытия деталей). Благодаря наличию очень мелких пор, громадное большинство материалов обладает поддающейся измерению влагопроницаемостью. Только для стекол, хорошо обожженной керамики и металлов влагопроницаемость практически равна нулю.

Количество влаги m [в микрограммах], проходящее за время τ часов через участок поверхности S [$см^2$] слоя материала толщиной h [$см$] под действием разности давлений водяных паров p_1 и p_2 [$мм$ рт. ст.] с двух сторон слоя, равно:

$$m = \Pi \frac{(p_1 - p_2) S}{h} \tau; \qquad (124)$$

это уравнение аналогично уравнению для прохождения через тело электрического тока; разность давлений $(p_1 - p_2)$ аналогична разности потенциалов, $\frac{m}{\tau}$ — величине тока, а $\frac{h}{\Pi S}$ — сопротивлению тела; коэффициент Π, аналогичный удельной объемной электропроводности, есть влагопроницаемость данного материала.

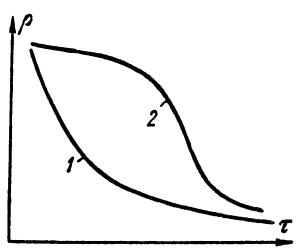


Рис. 77. Зависимость уменьшения удельного объемного электросопротивления непропитанной бумаги (кривая *1*) и пропитанной бумаги (кривая *2*) от времени пребывания во влажном воздухе.

Для различных материалов влагопроницаемость изменяется в весьма широких пределах. Так, для парафина значение Π равно 0,0007; для полистирола — 0,03; для триацетата целлюлозы — около 1 $мкг/см \cdot час \cdot мм$ рт. ст.

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их пропитка. Необходимо иметь в виду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других пористых органических диэлектриков дает лишь замедление увлажнения материала, не влияя на величину ρ после длительного воздействия влажности (см. рис. 77); это объясняется тем, что молекулы пропиточных материалов имеют весьма большие размеры по сравнению с размерами молекул воды и не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры они вообще не могут попасть.

При длительном использовании радиоаппаратуры, особенно в тропических условиях, на органических диэлектриках наблюдается развитие плесени. Появление плесени ухудшает удельное поверхностное электросопротивление диэлектриков, приводит к росту потерь и может также

ухудшить механическую прочность изоляции и вызвать коррозию соприкасающихся с ней металлических частей. К наиболее уязвимым для развития плесени относятся целлюлозные материалы, в том числе и пропитанные (гетинакс, текстолит), канифоль, битум и др. Наиболее стойкими к образованию плесени являются неорганические диэлектрики — керамика, стекла, слюда, кремнийорганические материалы и некоторые из органических, например эпоксидные смолы, фторопласт-4, полиэтилен, полистирол.

В защитные покрытия аппаратуры, предназначенной для использования в тропических условиях, вводят химические продукты, препятствующие росту плесени и повреждению материалов насекомыми.

§ 9. Тепловые свойства диэлектриков

К важнейшим тепловым свойствам диэлектриков относятся: теплостойкость (нагревостойкость) — кратковременная и длительная, морозостойкость, внутреннее трение, или вязкость при различных температурах, теплопроводность и тепловое расширение.

Теплостойкостью (нагревостойкостью) называют способность электроизоляционных материалов и изделий без вреда для них как кратковременно, так и длительно выдерживать воздействие высокой температуры, а также резких смен температуры.

Теплостойкость неорганических диэлектриков определяют, как правило, по началу существенного изменения электрических свойств, например заметному росту $\operatorname{tg}\delta$ или снижению удельного объемного электросопротивления.

Величину теплостойкости оценивают соответствующими значениями температуры (в °С), при которой появились эти изменения.

Теплостойкость органических диэлектриков часто определяют по началу механических деформаций растяжения или изгиба, погружению иглы под давлением при нагревании диэлектрика. Однако и для них возможно определение теплостойкости по электрическим характеристикам.

Вопрос о наивысшей допустимой рабочей температуре решается на основании тщательного изучения кратковременной и длительной теплостойкости материала с учетом коэффициента запаса, зависящего от условий эксплуатации, необходимой степени надежности и срока службы изоляции. В качестве примера широко употребляющихся способов оценки теплостойкости электроизоляционных материалов можно отметить способ Мартенса. По этому способу, применяемому для оценки качества пластмасс и подобных им материалов, теплостойкость характеризуют таким значением температуры, при котором изгибающее напряжение 50 $кГ/см^2$ уже вызывает заметную деформацию испытуемого образца. При этом скорость повышения температуры должна составлять ~ 1 *град/мин*. Как видим, метод Мартенса является условным кратковременным методом определения теплостойкости по изменению механических свойств материала.

Для различных диэлектриков по этому методу получаются следующие численные значения теплостойкости:

эбонит . . . . . 65—75° С
полистирол . . . . . 80—85° С
гетинакс . . . . . 150—180° С

Если ухудшение качества изоляции может обнаружиться при длительном воздействии повышенной температуры — за счет медленно протекающих химических процессов, то это так называемое т е п л о-

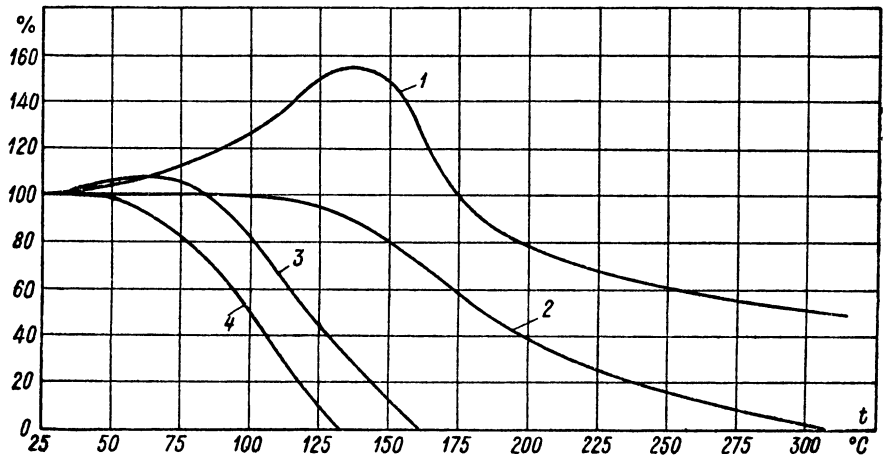


Рис. 78. Изменение прочности на разрыв (в % к начальной) волокнистых материалов при старении в течение месяца при различных температурах.
1— стеклянная нить; *2*— асбестовая пряжа; *3*— хлопчатобумажная пряжа; *4*—натуральный шелк.

в о е с т а р е н и е изоляции. Старение может проявляться, например, у лаковых пленок и целлюлозных материалов в повышении твердости и хрупкости, образовании трещин и т. п.

Для проверки стойкости электроизоляционных материалов к тепловому старению образцы этих материалов длительно выдерживают при сравнительно невысокой температуре, не вызывающей немедленного разрушения материала. Свойства образцов, старевших определенное время, измеряют и сравнивают со свойствами исходного материала (см. рис. 78).

Помимо температуры, существенное влияние на скорость старения могут оказать: повышение давления воздуха или концентрации кислорода, присутствие озона, являющегося более сильным окислителем, чем кислород, а также различных химических реагентов, ускоряющих или замедляющих старение. Тепловое старение ускоряется от освещения образца ультрафиолетовыми лучами, воздействия электрического поля, механических нагрузок и т. п.

Для ряда электроизоляционных материалов, в особенности хрупких (стекла, керамики и т. п.), важна стойкость по отношению к резким сменам температуры (тепловым импульсам). При быстром нагреве или охлаждении поверхности материала, за счет создания температурного перепада между наружным и внутренним слоями материала и неравномерного теплового расширения или сжатия, могут образоваться трещины.

Стойкость стекол и им подобных материалов к тепловым импульсам определяется величиной

$$F = \frac{\sigma_p}{\alpha_l E} \sqrt{\frac{\lambda_т}{c\rho}}, \qquad (125)$$

где α_l — температурный коэффициент линейного расширения материала;

σ_p — предел прочности при растяжении;

E — модуль упругости;

$\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности (см. ниже);

c — удельная теплоемкость;

ρ — плотность.

В качестве примера для определения теплостойкости материала по электрическим свойствам могут быть использованы кривые зависимости угла потерь от температуры, приведенные на рис. 55. Из рисунка следует, что теплостойкость калиевого пирекса $\sim$ 200° С, натриево-калиевого стекла $\sim$ 140° С, натриевого $\sim$ 60° С, а стекло № 65, уже начиная с комнатной температуры, дает прогрессирующий рост угла потерь с температурой. Из рис. 28 и 54 видно, что температура быстрого роста диэлектрической проницаемости и угла потерь существенно зависит и от частоты воздействующего на диэлектрик электрического поля.

Таким образом, допустимый для эксплуатации материала или изделия температурный режим может определяться различными факторами. В результате испытаний устанавливается стойкость материала к тепловым воздействиям, причем стойкость эта в различных случаях может быть неодинаковой; например, материал, легко выдерживающий кратковременный нагрев до некоторой температуры, может оказаться неустойчивым по отношению к тепловому старению при длительном воздействии даже более низкой температуры; или материал, могущий длительно выдерживать нагрев до высокой неизменной температуры, при быстром охлаждении растрескивается, меняет свои электрические свойства и т. п.

Как уже указывалось, испытание на действие повышенной температуры иногда приходится увязывать и с одновременным воздействием повышенной влажности воздуха (тропические условия).

Морозостойкость. В противоположном случае, когда радиоаппаратура используется в арктических (и антарктических) условиях или на относительно больших высотах над поверхностью Земли, важна морозостойкость, т. е. способность изоляции работать без ухудшения эксплуатацион-

ной надежности при низких температурах, например порядка от —60 до —80° С. При низких температурах, как правило, электрические свойства изоляционных материалов улучшаются; однако многие материалы, гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких температурах становятся весьма хрупкими и жесткими, что создает ненадежность работы изоляции. Испытания электроизоляционных материалов и изделий из них на действие низких температур нередко проводятся при одновременном воздействии вибраций.

Вязкость. Для жидких и полужидких электроизоляционных материалов, масел, лаков, заливочных и пропиточных компаундов и т. п. важной характеристикой является вязкость.

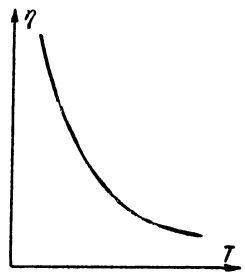


Рис. 79. Типичная зависимость вязкости жидкости от температуры.

Динамическая вязкость, или коэффициент внутреннего трения жидкости, представляет собой величину, входящую в целый ряд законов гидродинамики. Так, количество (объем) жидкости с динамической вязкостью η, протекающее за время τ под действием давления p сквозь капилляр длиной l и радиусом r, по закону Пуазейля равно:

$$V = \frac{1}{\eta}\frac{\pi p r^4 \tau}{8l} \qquad (126)$$

Скорость движения твердого шарика радиуса r в неограниченной среде с динамической вязкостью η под влиянием непрерывно воздействующего на шарик небольшого усилия F постоянна и имеет величину, определяемую законом Стокса:

$$v = \frac{1}{\eta}\cdot\frac{F}{6\pi r}. \qquad (127)$$

Кинематическая вязкость ν равна отношению динамической вязкости жидкости к ее плотности:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \qquad (128)$$

Вязкость всех веществ, не претерпевающих при нагреве химических изменений, сильно уменьшается при повышении температуры (рис. 79).

Как правило, закон изменения вязкости с температурой соответствует уравнению экспоненты:

$$\eta = Ae^{\frac{w}{kT}}, \qquad (129)$$

где A — постоянная, характеризующая данную жидкость;

w — энергия активации, равная работе перехода молекулы из одного устойчивого положения в другое.

Единицы для измерения вязкости известны из курса физики.

В ряде случаев определяют условную вязкость (ВУ) по Энглеру, т. е. отношение времени истечения из вискозиметра Энглера 200 *мл* испытуемой жидкости (при заданной температуре испытания) к постоянной прибора (представляющей собой время истечения 200 *мл* дистиллированной воды при 20°С). Она выражается в „градусах Энглера" или °ВУ и в первом приближении пропорциональна кинематической вязкости жидкости.

Теплопроводность. Практическое значение теплопроводности объясняется тем, что тепло, выделяющееся вследствие потерь мощности в окруженных изоляцией проводниках и магнитопроводах трансформаторов, а также вследствие диэлектрических потерь в изоляции переходит в окружающую среду через различные материалы.

Теплопроводность влияет на электрическую прочность при тепловом пробое (см. § 7) и на стойкость материала к тепловым импульсам. Теплопроводность материалов характеризуют коэффициентом теплопроводности $\lambda_т$ из уравнения Фурье:

$$\Delta P_т = \frac{dQ}{d\tau} = \lambda_т \frac{dT}{dl} \Delta S, \qquad (130)$$

где $\Delta P_т$ — мощность теплового потока через площадку ΔS, нормальную к потоку энергии;

$\frac{dT}{dl}$ — градиент температуры;

Q — количество тепла.

Значение коэффициента теплопроводности некоторых диэлектриков приведены в табл. 23.

Таблица 23

Значения коэффициента теплопроводности некоторых диэлектриков

Материал	$\lambda_т$, *вт/см·град*
Воздух (в малых зазорах) . . .	0,00025
Битумы	0,0007
Бумага	0,0010
Лакоткань	0,0013
Гетинакс	0,0035
Вода	0,0058
Плавленый кварц	0,0125
Фарфор	0,016
Стеатит	0,022
Кристаллический кварц	0,125
Алюминоксид	0,300

Значения $\lambda_т$ для электроизоляционных материалов значительно меньше, чем для металлов. Наименьшим значением $\lambda_т$ обладают пористые электроизоляционные материалы с воздушными включениями.

При пропитке, а также при уплотнении материалов внешним давлением $\lambda_т$ увеличивается.

Как общее правило, кристаллические диэлектрики имеют $\lambda_т$ бо́льшие, чем аморфные. Величина $\lambda_т$ несколько зависит от температуры.

Тепловое расширение. Тепловое расширение диэлектриков, как и других материалов, оценивают температурным коэффициентом линейного расширения:

$$\alpha_l = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} \; [град^{-1}]. \qquad (131)$$

Материалы, обладающие малыми значениями температурного коэффициента линейного расширения, имеют, как правило, наиболее высокую теплостойкость и наоборот. Для определения α_l по графическим зависимостям $l = F(t)$ можно пользоваться методом, аналогичным описанному в § 4 для определения $\alpha_{\varepsilon'}$. В качестве примера в табл. 24 приведены температурные коэффициенты линейного расширения некоторых электроизоляционных материалов в интервале от 20 до 100° С.

Таблица 24

Температурные коэффициенты линейного расширения некоторых диэлектриков

Наименование материала	$\alpha_l \cdot 10^6$, *град* $^{-1}$	Примечание
Кварцевое стекло	0,55	Неорганические
Ультрафарфор	4,5	
Стеатит	7	
Феноло-формальдегидная, анилино-формальдегидная и другие пластмассы с наполнителем	50 ÷ 70	Органические
Полихлорвиниловый пластикат	70	
Полистирол	60 ÷ 100	
Полиэтилен	100	

§ 10. Механические свойства диэлектриков

Поскольку детали из электроизоляционных материалов подвергаются воздействию механических нагрузок, большое практическое значение имеют механическая прочность этих материалов и способность их не деформироваться под действием механических напряжений.

Прочность на разрыв, сжатие и изгиб. Простейшие виды статических механических нагрузок — растягивающих, сжимающих и изгибающих — изучаются на основании элементарных закономерностей, известных из курса сопротивления материалов.

Полученные значения пределов прочности при растяжении $\sigma_р$, сжатии $\sigma_с$ и изгибе $\sigma_и$ выражаются в $кГ/см^2$.

Для электроизоляционных материалов анизотропного строения (слоистых, волокнистых и т. п.) значения механической прочности сильно зависят от направления приложения нагрузки. Важно отметить, что для ряда диэлектриков (стекол, керамических материалов, многих пластмасс и др.) предел прочности при сжатии значительно больше, чем при разрыве и изгибе (в то время как у металлов величины $\sigma_р$, $\sigma_с$ и $\sigma_и$ имеют один и тот же порядок). Так, например, у кварцевого стекла при сжимающих напряжениях можно получить $\sigma_с \approx 20\,000$ *кГ/см*^{2}, а при растяжении — $\sigma_р$ всего до 500 *кГ/см*^{2}.

Механическая прочность ряда диэлектриков сильно зависит от площади поперечного сечения образцов. На рис. 80 показано возрастание прочности стеклянного волокна при уменьшении его диаметра. При диаметрах порядка 0,01 *мм* она становится равной прочности бронзы.

Механическая прочность электроизоляционных материалов сильно зависит от температуры, как правило, уменьшаясь при повышении последней. Это положение иллюстрируется кривой рис. 81.

Прочность гигроскопичных материалов нередко существенно зависит от влажности.

Определение значений предела прочности и относительной деформации при разрушении дает некоторое представление о механической прочности и способности деформироваться под нагрузкой (пластических свойствах) материала. Однако эти определения еще не рисуют исчерпывающей картины поведения материала во многих практически важных случаях механической нагрузки. Так, для некоторых материалов (в особенности термопластичных) характерна способность при длительном воздействии сравнительно малых нагрузок давать заметные деформации: это так называемое пластическое или холодное течение материала (фторопласт-4). Пластическое течение весьма нежелательно, если изделие в эксплуатации должно длительно сохранять неизменными форму и размеры. При повышении температуры и приближении ее к температуре размягчения данного материала пластическое течение материала сильно увеличивается.

В ряде случаев большое практическое значение имеют хрупкость, твердость и некоторые другие механические характеристики электроизоляционных материалов.

Хрупкость. Многие материалы хрупки, т. е. обладая сравнительно высокой прочностью по отношению к статическим нагрузкам, в то же время легко разрушаются динамическими, т. е. внезапно прилагаемыми усилиями.

На рис. 82 приведены кривые зависимости удлинения при растяжении от удельной нагрузки для радиокерамического материала — стеатита и литой стали. Из рис. 82 следует, что у керамики предел упругости и предел прочности при статическом растяжении практически совпадают.

Распространенным приемом для оценки способности материала сопротивляться действию динамических нагрузок является испытание

на ударный изгиб (определение удельной ударной вязкости). Удельную ударную вязкость $\sigma_{уд}$ материала находят делением затраченной на излом образца энергии на поперечное сечение образца. Удельная ударная вязкость измеряется в $кГ \cdot см/см^2$ или $кГ/см$. Очень высокой удельной ударной вязкостью обладает полиэтилен, не ломающийся при $\sigma_{уд} > 100$ $кГ \cdot см/см^2$; для керамических материалов и микалекса $\sigma_{уд}$ составляет всего 2—5 $кГ \cdot см/см^2$.

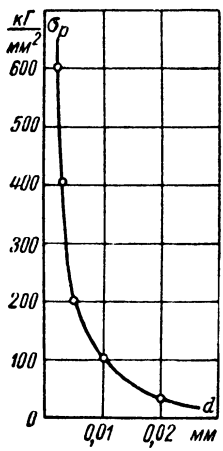


Рис. 80. Предел прочности при растяжении стеклянного волокна в функции от диаметра.

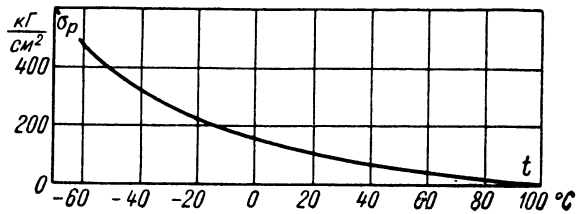


Рис. 81. Зависимость механической прочности полиэтилена от температуры.

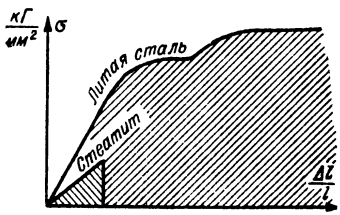


Рис. 82. Зависимость относительного удлинения при растяжении от удельной нагрузки для стали и стеатита.

В ряде случаев проверяют способность электроизоляционных материалов выдерживать без разрушения длительное воздействие вибраций, т. е. повторяющихся колебаний определенной частоты и амплитуды. Такая проверка чаще всего производится на готовых изделиях, которые для этой цели крепят на платформах (вибростендах), подвергающихся вибрациям по заданному режиму от соответствующего приводного механизма. Определение вибрационной стойкости важно, например, для изоляции самолетного электро- и радиооборудования.

Твердость. Твердость, т. е. способность поверхностного слоя материала противостоять деформации от сжимающего усилия, передаваемого через посредство предмета малых размеров, имеет для диэлектриков менее существенное значение и определяется различными методами: для неорганических материалов — по минералогической шкале, для органических диэлектриков — по способу Бринелля и маятником Кузнецова.

Для многих диэлектриков важной механической характеристикой является эластичность, т. е. способность материалов испытывать более или менее значительные упругие обратимые деформации без разрушения при действии небольших растягивающих усилий.

§ 11. Химические свойства диэлектриков и поведение их под воздействием излучений высокой энергии

Химические свойства

Химические свойства диэлектриков интересны по двум причинам:

1) материалы должны быть надежными при длительной работе — не разрушаться с выделением побочных продуктов и не вызывать коррозии соприкасающихся с ними металлов; не реагировать с различными веществами (например газами, водой, кислотами, щелочами, растворами солей и т. п.). Стойкость к действию всех этих веществ у разных диэлектриков весьма разнообразна;

2) материалы в производстве деталей могут обрабатываться химико-технологическими способами — склеиваться, растворяться в растворителях с образованием лаков и т. д.

Растворимость твердых материалов может быть оценена количеством материала, переходящим в раствор за единицу времени с единицы поверхности материала, соприкасающейся с растворителем. Нередко оценивают растворимость по тому наибольшему количеству вещества, которое может быть растворено в данном растворителе.

Легче всего растворяются вещества, близкие к растворителю по химической природе и содержащие в молекулах похожие группировки атомов; дипольные вещества легче растворяются в дипольных жидкостях, нейтральные — в нейтральных. Так, неполярные или слабополярные углеводороды (например парафин, каучук) растворяются в жидких углеводородах; дипольные смолы, содержащие гидроксильные группы (феноло-формальдегидные и другие смолы), растворяются в спирте и иных полярных растворителях. Растворимость уменьшается с повышением степени полимеризации (молекулярного веса); высокомолекулярные вещества с линейной структурой молекул растворяются сравнительно легко, а с пространственной структурой — весьма трудно или не растворяются. При повышении температуры растворимость обычно увеличивается.

В последующих главах при рассмотрении характеристик материалов будут отмечаться наиболее опасные внешние факторы, оказывающие разрушающее химическое воздействие на тот или иной материал.

Воздействие излучений высокой энергии

В современной радиоэлектронике возможны условия использования радиоаппаратуры, при которых она оказывается под кратковременным или длительным воздействием корпускулярных или волновых

радиоактивных излучений высокой энергии. При этом важно знать степень устойчивости материалов к воздействию излучений, сохранения ими своих электрических и механических свойств, т. е. устойчивость к радиационному старению. Поэтому к известным физическим, электрическим и химическим характеристикам теперь должны добавляться технические условия по радиационной стойкости.

С другой стороны, излучения высокой энергии могут быть использованы в технологических процессах создания новых материалов и получения у них ценных для практики свойств (например повышения теплостойкости), или для синтеза новых материалов. Совершенно новая технология изготовления раскрывается перед промышленностью пластмасс. Могут быть разработаны новые классы материалов с такими свойствами, которые нельзя было получить ранее.

Наконец, в некоторых случаях от материалов требуются выполнения функций поглотителей — экранов для излучений, наряду с использованием их основных электрических и механических свойств.

К корпускулярным излучениям относятся быстрые и медленные нейтроны, осколки ядер, α-частицы и β-лучи — электроны различных скоростей. К волновым излучениям принадлежат γ-лучи, жесткое и мягкое рентгеновские излучения.

С количественной стороны излучение измеряют в рентгенах, а для нейтронов очень часто просто указывают плотность потока быстрых или медленных нейтронов на 1 $см^2$. Более точной характеристикой можно считать произведение:

плотность нейтронов × скорость × время облучения.

Представление об единицах излучения дает табл. 25.

Таблица 25

Единицы излучения

Единица	Наименование	Сокращенное обозначение	Определение
Физической дозы излучения	Рентген	*р* (r)	Физическая доза излучения, при которой в результате полного использования ионизационного действия в воздухе при 0° С и давлении 760 *мм* рт. ст. в 1 $см^3$ образуется заряд одного знака, равный $0{,}33 \cdot 10^{-9}$ *к*
Мощности физической дозы (плотности интенсивности в спектре)	Рентген в секунду	*р/сек* (r/sec)	Мощность физической дозы излучения, при которой в течение 1 *сек* физическая доза равномерно нарастает на 1 *р*

Механический эквивалент рентгена следующий:

$$1\ p = 0{,}11\ эрг/см^3 = 0{,}011\ дж/м^3 = 6{,}9 \cdot 10^4\ Мэв/см^3.$$

Для ориентировки в величинах воздействия излучений на различные материалы укажем, что в настоящее время принято считать, что при облучении гамма- или рентгеновскими лучами предельно допустимая для человеческого организма доза равна 0,05 *р/день*, т. е. при шестичасовом рабочем дне составляет не более 2,3 *мкр/сек*.

Энергия излучения, попадая на поверхность материала, убывает по мере проникновения в глубину материала по закону:

$$P_x = P_0 e^{-\mu x}, \tag{132}$$

где P_0 — мощность физической дозы в воздухе у поверхности материала;

x — глубина;

μ — эффективный коэффициент ослабления излучения в материале.

Эффективный коэффициент ослабления излучения для простых веществ составляет:

$$\mu \approx K \lambda^3 Z^3 \rho, \tag{133}$$

где λ — длина волны излучения;

Z — номер элемента по таблице Менделеева;

ρ — плотность;

K — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, поглощение излучения в объеме материала, как видно из выражения (133), зависит от его природы и качества самого излучения. Рассеяние энергии излучения происходит в основном за счет ионизации (внутренний фотоэффект) и возбуждения атомов комптоновского эффекта и при очень больших энергиях за счет ядерных преобразований. Часть энергии расходуется на выбивание атомов или ионов в междуузлие, а в решетке появляются „вакансии" и дефектные центры (см. рис. 18).

Ионизация вещества может быть ступенчатой, с образованием вторичных и даже третичных атомов отдачи. Подобные процессы происходят и при облучении вещества заряженными частицами. При облучении быстрыми нейтронами имеет место значительное нарушение структуры вещества и в больших объемах, так как они не испытывают торможения электрическими полями электронных оболочек и ядер атомов, а следовательно, обладают большей длиной пробега.

Нарушение структуры вещества заряженными частицами происходит в основном в поверхностном слое. Облучение материалов осколками деления ядер вызывает рассмотренные выше процессы с образованием большого числа первично-вторичных и т. д. атомов отдачи, а иногда и ряда ядерных превращений.

Воздействие излучения может привести к ряду молекулярных преобразований и химических реакций. Ионизационные процессы вызывают мгновенный поток электронов, которые скапливаются в местах дефектов, а также разрыв и перемещение химических связей

и образование свободных радикалов. При этом инициируются различные химические реакции. В частности, в органических полимерах происходят: выделение газа, образование и ликвидация двойных связей, полимеризация, образование поперечных связей, вулканизация и пр. Характер и степень изменения свойств полимера за время испытания определяются преобладающим процессом. Под действием образования поперечных связей могут наблюдаться различные изменения физических свойств.

При длительном или очень интенсивном облучении в конечном счете произойдет разрушение любого полимера, подвергаемого облучению.

Материалы, стойкие к облучению, должны обладать двумя свойствами: 1) способностью поглощать энергию без чрезмерной ионизации; 2) способностью в большей мере образовывать двойные связи, чем обнаруживать разрыв цепей.

Под действием облучения у полимеров возможен переход из одного структурного состояния в другое.

Влияние облучения на неорганические диэлектрики — кварц, слюду, глинозем, окись циркония, окись бериллия и слюдяные материалы со стекловидным связующим — менее сильное. При облучении у них образуются центры окрашивания, удельное электросопротивление и электрическая прочность их могут снизиться.

Наибольшее влияние облучение оказывает на поверхностные свойства материалов. После отжига облученных неорганических диэлектриков возможно возвращение в исходное состояние. По стойкости к действию излучения рассмотренные в § 3 связи могут быть расположены в такой последовательности: металлическая, ионная, атомная и молекулярная.

Рассмотрение процессов, вызываемых воздействием излучения на материалы, показывает, что у последних может произойти изменение практически всех свойств — электрических, химических и физико-механических. Это можно показать на конкретных примерах поведения отдельных материалов.

На рис. 83 показано изменение предела прочности при растяжении и удельной ударной вязкости фенольной смолы в функции от дозы быстрых нейтронов. Как видно из рисунка, при плотности облучения 10^{15}—10^{16} быстрых нейтронов на 1 $см^2$ механические характеристики смолы очень резко понижаются. Политетрафторэтилен при облучении дозой $5 \cdot 10^6$ $р$ становится очень хрупким и рассыпается, а полиизобутилен из резиноподобного вещества превращается в вязкую жидкость и молекулярный вес его снижается более чем в 15 раз.

На рис. 84 показаны кривые изменения удельного объемного электросопротивления лучших органических высокочастотных диэлектриков в зависимости от времени γ-облучения. Как видно из рисунка, снижение удельного объемного электросопротивления полиэтилена достигает целого порядка, в то время как полистирол и политетрафторэтилен изменяют свое удельное объемное электросопротивление незначительно.

При большой дозе облучения у всех материалов имеется тенденция к новому возрастанию удельного объемного электросопротивления. Степень изменения удельного объемного электросопротивления по-

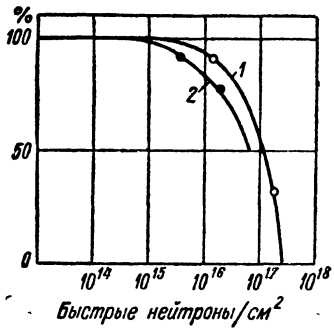


Рис. 83. Предел прочности при растяжении (кривая *1*) и удельная ударная вязкость (кривая *2*) фенольной смолы в функции от дозы облучения потоком быстрых нейтронов.

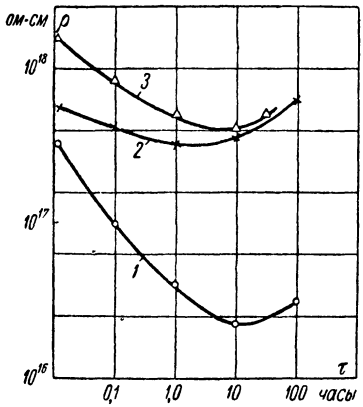


Рис. 84. Удельное объемное электросопротивление при 20°С высокомолекулярных нейтральных полимеров в функции времени γ-облучения (кобальтом-60) при плотности интенсивности 100 *р/час*.

1— полиэтилен; *2*— политетрафторэтилен; *3* — полистирол.

лимеров при облучении существенно зависит от температуры диэлектрика. Так, например, после сильного облучения жесткими рентгеновскими лучами $\frac{\rho_{необл.}}{\rho_{обл.}}$ образцов в одной из работ при температуре 20°С составляло четыре порядка, а при температуре 90° С это отношение уменьшилось до одного порядка.

Данные рисунков 85 и 86 относятся к электрической прочности материалов, подвергшихся облучению. По оси ординат на этих рисунках отложено напряжение, а по оси абсцисс — часть общего количества испытанных образцов, выдерживающих это напряжение. Точки пересечения кривых с пунктирной вертикальной линией соответствуют наиболее вероятным величинам пробивного напряжения.

Облучение полихлорвинила (рис. 85) оказывает незначительное влияние на наклон графиков; пробивное напряжение при облучении возрастает.

При облучении полиэтилена не имеется ясно выраженного изменения наиболее вероятной величины пробивного напряжения в зависимости от дозы облучения (рис. 86), однако наблюдается заметное увеличение наклона графиков.

В некоторых конструкциях желательно защитить электроизоляционный материал герметической оболочкой. В этих условиях тенденция твердых органических материалов выделять газ при облучении оказывается решающей для конструирования.

На рис. 87 показана зависимость скорости выделения газа из волокнистого материала, пропитанного кремнийорганическим лаком, от

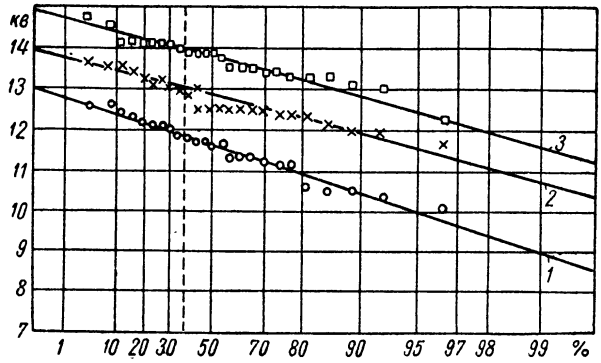


Рис. 85. Кратковременное пробивное напряжение полихлорвиниловой пленки толщиной 0,24 *мм*.

1— до облучения; *2*— после дозы 10^7 *р*; *3*— после дозы 10^8 *р*.

времени облучения. Интересно отметить, что количество выделяемого газа перестает снижаться примерно через месяц после начала облучения и что химический состав газа остается приблизительно постоян-

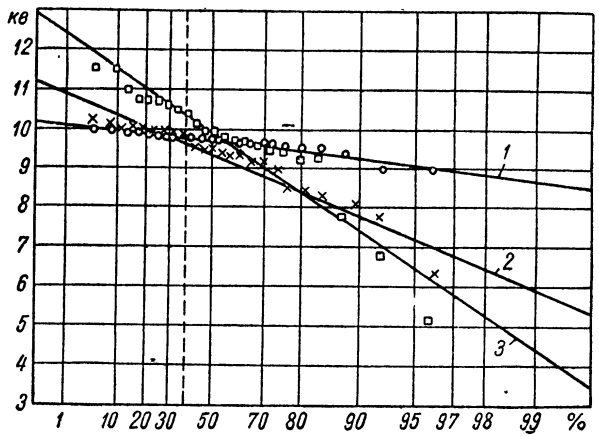


Рис. 86. Кратковременное пробивное напряжение полиэтиленовой пленки толщиной 1,15 *мм*:

1— до облучения; *2*— после дозы $10^7 р$; *3*— после дозы 10^8 *р*.

ным. Разложение материала при высокой температуре (95—220° С) дает совершенно иной состав выделяющихся газов, чем наблюдаемый при облучении. Это указывает на то, что процесс, вызванный облу-

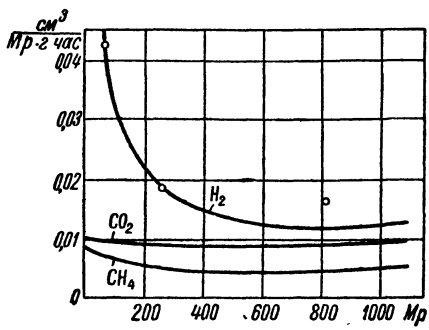


Рис. 87. Скорость выделения газов (водорода, углекислоты и метана) из кремнийорганической смолы в функции суммарной дозы. По оси абсцисс отложена суммарная доза в мегарентгенах, по оси ординат — выделение газа в кубических сантиметрах в час одним граммом смолы на один мегарентген.

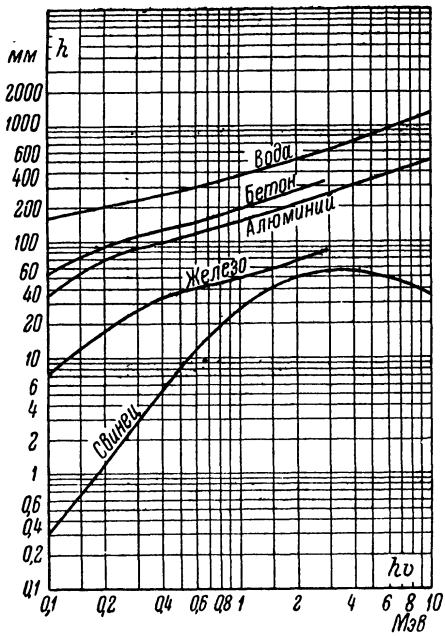


Рис. 88. Изменение толщины слоя десятикратного ослабления для различных материалов в зависимости от энергии квантов излучения.

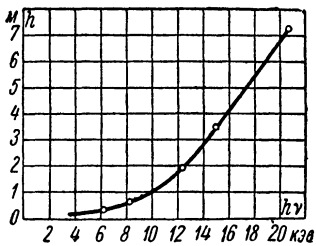


Рис. 89. Значение слоя половинного ослабления для воздуха при $p = 760$ *мм.* рт. ст. и 20° С в зависимости от энергии излучения.

чением, отличается от обычного теплового старения электроизоляционных материалов.

Работы по изучению устойчивости диэлектриков к корпускулярным и волновым излучениям высокой энергии должны развиваться и углубляться, так как поведение уже исследовавшихся и еще малоизученных в этих условиях материалов недостаточно ясно и требует уточнения и проверки.

В настоящее время ведутся работы по применению радиоактивных излучений в технологических процессах производства диэлектриков.

При облучении полиэтилена дозой порядка 5 *Мр* удается повысить его теплостойкость со 105 до 300° С. Молекулярные цепи облученного полиэтилена в четыре-пять раз длиннее обычных, за счет чего увеличивается механическая прочность этого материала; при этом электрические свойства его не ухудшаются: так, тангенс угла диэлектрических потерь остается меньше $5 \cdot 10^{-4}$ при частотах до 10^9 *гц*.

Защитные свойства различных материалов удобно характеризовать слоем десятикратного ослабления, т. е. толщиной слоя вещества, после прохождения которого интенсивность излучения ослабляется в 10 раз. Эта характеристика значительно облегчает расчеты защиты. Например, для ослабления в 100 раз необходимо взять толщину защитного вещества, равную двум слоям десятикратного ослабления. Очевидно, n слоев десятикратного ослабления снизит интенсивность излучения в 10^n раз.

На рис. 88 приведены кривые зависимости толщины слоев десятикратного ослабления для воды и баритового бетона (80% по весу $BaSO_4$ и 20% цемента) в сравнении с некоторыми металлами от энергии квантов излучения. Из рисунка видно увеличение поглощения с ростом плотности материалов, а также зависимость от энергии квантов.

На рис. 89 приведены зависимости толщин слоев половинного ослабления воздуха от энергии излучений. Как видно из рисунка, с увеличением энергии излучения толщина слоя сильно возрастает и при энергии 10 *кэв* становится больше метра.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

§ 12. Основы строения и классификация органических диэлектриков

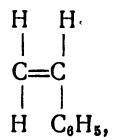
Среди материалов, используемых для изготовления электрической изоляции, большое место занимают органические вещества, т. е. соединения, содержащие связанные между собой атомы углерода (С). В их число входят газы (например этилен), жидкости (например конденсаторное масло) и весьма многочисленные и разно-

образные твердые вещества — смолы, волокнистые материалы (бумага, хлопчатобумажное волокно, натуральный и искусственный шелк), каучук, пластические массы и др.

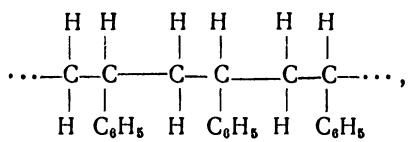
Некоторые из органических диэлектриков представляют собой низкомолекулярные неполимеризующиеся вещества, молекулы которых состоят из сравнительно небольшого числа (до нескольких десятков или сотен) атомов; таковы, например, конденсаторное масло, вазелин, церезин. Однако наибольшее количество практически применяемых органических электроизоляционных материалов относится к высокомолекулярным соединениям, т. е. является веществами с чрезвычайно большими молекулами, содержащими иногда многие тысячи атомов. Молекулярный вес таких веществ доходит до 10^6, а геометрические размеры молекул могут быть настолько велики, что растворы этих веществ по свойствам начинают приближаться к коллоидным системам. К высокомолекулярным соединениям принадлежат многие смолы, целлюлоза и ее производные, шелк, каучук и т. п.

Как было указано в § 3, по химической природе многие из высокомолекулярных соединений представляют собой полимеры, т. е. вещества, молекулы которых получаются при соединении друг с другом большого числа молекул более простых по составу веществ, так называемых мономеров. Реакция образования полимеров из мономеров носит общее название полимеризации.

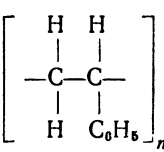
Пример. Стирол — жидкий ненасыщенный углеводород, имеющий состав C_8H_8 и строение



благодаря наличию сравнительно непрочной двойной связи между двумя соседними атомами углерода обладает способностью к полимеризации. Образующийся твердый полимер стирола — полистирол — имеет строение



т. е. его молекула имеет вид цепочки, состоящей из одинаковых, повторяющихся звеньев, и может быть представлена в виде



где n — степень полимеризации, т. е. число молекул мономера, объединившихся в молекулу полимера.

Полимеры представляют собой смеси веществ с различной степенью полимеризации, так что практически можно говорить лишь о средней степени полимеризации. Для полистирола средняя величина n может доходить до 6000; полимер $(C_8H_8)_{6000}$ имеет молекулярный вес 624 000 (молекулярный вес мономера — стирола C_8H_8 — составляет 104).

Процесс полимеризации может быть значительно ускорен различными факторами (повышение температуры, освещение, присутствие катализаторов, радиоактивное облучение и т. д.).

Понятно, что в случаях, подобных полимеризации стирола, когда молекулы полимера образуются из одинаковых молекул мономера, причем все их атомы полностью входят в состав молекул полимера, органический элементарный анализ полимера дает тот же процентный состав, что и для мономера. Но могут быть и более сложные случаи полимеризации; таковы совместная полимеризация нескольких мономеров различного состава и поликонденсация, т. е. полимеризация, связанная с перегруппировкой атомов полимеров и выделением из сферы реакции воды или других низкомолекулярных веществ.

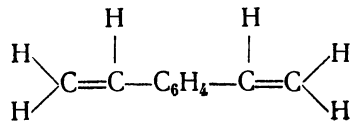
По строению молекул полимеры делятся (см. § 3) на два класса — линейные и пространственные полимеры.

У линейных полимеров отношение длины молекулы к ее поперечным размерам чрезвычайно велико и может быть порядка 1000; так, молекула полистирола с $n = 6000$ имеет длину около $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ *см* при поперечнике $1{,}5 \cdot 10^{-7}$ *см*; молекулы каучука и целлюлозы имеют длину $(4 \div 8) \cdot 10^{-5}$ *см* при поперечнике $(3 \div 7{,}5) \cdot 10^{-8}$ *см*.

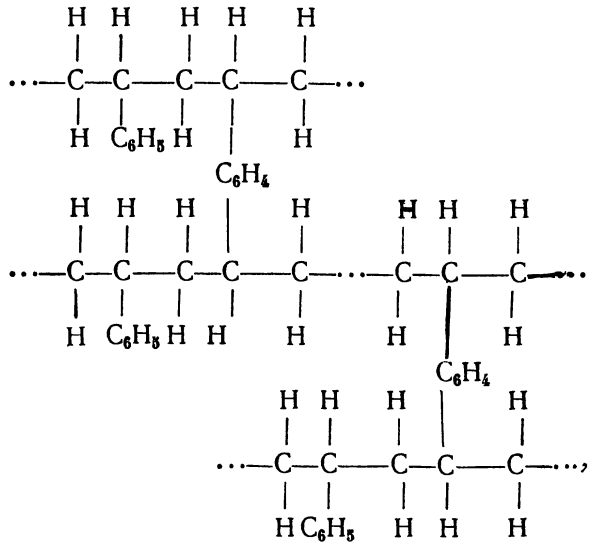
Молекулы пространственных полимеров развиты в пространстве в разных направлениях, так что они имеют более компактную форму, чем молекулы линейных полимеров.

Легко понять основную закономерность, которая определяет образование линейных или же пространственных полимеров. Если молекулы мономеров имеют только по две реактивные точки, т. е. две валентности, способные освобождаться и соединяться с другими молекулами, то в результате полимеризации получится линейный полимер — цепочка, не могущая иметь никаких разветвлений. Это мы видели на примере стирола, молекула которого имеет две реактивные точки. Если же объединяются мономерные молекулы, из которых хотя бы часть имеет три (или более) реактивные точки, то возможно получение разветвленного строения, свойственного пространственным полимерам.

Так, например, при совместной полимеризации стирола с небольшим количеством дивинилбензола, молекула которого



благодаря наличию двух активных двойных связей имеет четыре реактивные точки, получается пространственный полимер:



который мы можем рассматривать как ряд линейных полистирольных молекул, „сшитых" друг с другом.

Между свойствами линейных и пространственных полимеров имеются существенные различия.

Как правило, линейные полимеры сравнительно гибки и эластичны; многие из них при умеренном повышении температуры легко размягчаются и расплавляются. Пространственные полимеры обладают большой жесткостью, расплавление их происходит лишь при высоких температурах, а многие из них ранее достижения температуры плавления разрушаются химически (сгорают, обугливаются и т. п.)

Линейные полимеры в большинстве случаев способны растворяться в подходящих по составу растворителях; пространственные полимеры с трудом поддаются растворению, а многие из них практически нерастворимы. В связи с этими свойствами, линейные полимеры в практике называют термопластичными материалами, а пространственные — термореактивными.

Линейные полимеры могут иметь аморфное или кристаллическое строение. В первом случае молекулы расположены беспорядочно, и полимер может быть жестким или эластичным.

При кристаллическом строении наблюдается частичю упорядоченное расположение молекул; это может быть в материалах при низких температурах, а в некоторых соединениях и при нормальной температуре.

Со строением полимеров связана их способность при вытягивании образовывать из растворов или расплавов тонкие, гибкие и прочные

нити (волокна), пригодные для изготовления текстильных материалов, а также пленки. Такой способностью обладают многие из линейных полимеров с достаточно длинными молекулами (полистирол, полихлорвинил, эфиры целлюлозы, капрон и пр.); пространственные полимеры не могут образовывать текстильных волокон.

Гигроскопичность и электрические свойства полимеров зависят от их состава и строения. Вещества с несимметрично построенными звеньями полимерных молекул являются дипольными и обычно обладают известной гигроскопичностью, невысокими или средними электрическими характеристиками. Высокомолекулярные углеводороды с симметрично построенными молекулами практически нейтральны или слабополярны, гигроскопичность их ничтожно мала, а потому они имеют малое значение тангенса угла диэлектрических потерь и низкую электропроводность.

Высокомолекулярные соединения — линейные или пространственные полимеры, при всем разнообразии их происхождения и свойств, характеризующиеся сходным строением и некоторыми общими физическими свойствами, получили название искусственных смол.

Большая часть практически применяемых полимеризационных смол принадлежит к термопластичным веществам. Конденсационные смолы бывают как термореактивными (например бакелит и глифталь), так и термопластичными (например новолак и полиамидные смолы).

Конденсационные смолы при их использовании для целей электрической изоляции проявляют общий недостаток, выражающийся в том, что при отвердевании они выделяют воду или другие летучие вещества, остатки которых в смоле увеличивают ее электропроводность. Кроме того, молекулы конденсационных смол содержат полярные группы, что повышает их угол диэлектрических потерь и гигроскопичность; полимеризационные же смолы могут быть и неполярными (например полиэтилен, полистирол).

В радиоэлектронике применяется очень большое число различных органических диэлектриков, из которых наибольшее значение имеют синтетические высокомолекулярные вещества. Для облегчения изучения органических диэлектриков их можно подразделить на следующие группы, в зависимости от структуры, технологии производства изделий и применения:

а) пластические массы;

б) пропиточные материалы, компаунды, лаки и клеи;

в) каучуковые материалы;

г) целлюлозные материалы и слоистые пластики.

Промежуточной группы веществ с повышенной теплостойкостью, стоящих по своему строению между органическими и неорганическими диэлектриками, являются кремнийорганические соединения и материалы на их основе.

В настоящее время ведутся работы по синтезу и изучению ряда новых металлоорганических соединений, предназначенных для работы при температурах 500 — 650° С.

§ 13. Пластические массы

Пластические массы могут состоять из одного высокомолекулярного вещества, а у других высокомолекулярное вещество служит связующим, и в состав пластмассы входят, кроме него, наполнители, пластификаторы и красители. Такие пластмассы часто называют к о м п о з и ц и о н н ы м и. Свойства композиционных пластмасс обусловливаются как свойствами связующего вещества, так и наполнителей.

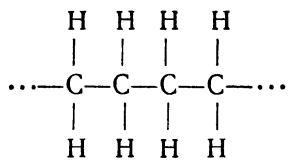
Пластические массы выпускаются химической промышленностью в виде порошков различного гранулометрического состава для последующей формовки или прессования изделий в виде плотных блоков, поддающихся механической станочной обработке, в виде листов разной толщины, труб, тонких пленок и нитей, а также в виде п е н о п л а с т о в. Последние представляют собой твердые или эластичные материалы, содержащие большое число газовых включений. Они могут быть получены путем полимеризации вспененной водной эмульсии или путем введения в пресспорошок газообразователей, например углекислой соли аммония, разлагающихся при повышенной температуре прессования, или другими способами.

Обладая незначительным объемным весом, пенопласты стойки к действию влаги, прочны, отличаются плавучестью, высокими электро-, тепло- и звукоизоляционными свойствами.

Ниже приводится краткое описание наиболее распространенных пластических масс.

Пластмассы с малыми диэлектрическими потерями (нейтральные)

П о л и э т и л е н получают полимеризацией этилена C_2H_4 или $H_2C = CH_2$, обычно при высоких давлении и температуре; он имеет строение:



и молекулярный вес до 20 000—35 000.

Физические свойства полиэтилена определяются его химической структурой. В обычных температурных условиях полиэтилен содержит кристаллические (около 75%) и аморфные образования (около 25%). Такая структура позволяет полиэтилену сохранять известную степень гибкости при весьма низких температурах — до —70° С; с другой стороны, полиэтилен сохраняет достаточно высокие механические свойства при нагреве до +80° С. Температура плавления кристалла полиэтилена составляет около 110° С.

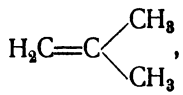
Полиэтилен весьма стоек к действию щелочей и кислот. При нагреве механическая прочность его быстро снижается (см. рис. 81). Этот материал обладает сравнительно большой эластичностью.

В зависимости от величины относительного удлинения при растяжении выпускаются четыре марки полиэтилена: ПЭ-150, ПЭ-300, ПЭ-450 и ПЭ-500. Ориентировочные значения основных свойств полиэтилена приведены в табл. 26.

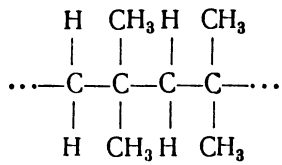
Применяя специальные катализаторы, можно получить полиэтилен при низком давлении, который отличается повышенной теплостойкостью и плотностью благодаря большей кристалличности. Увеличения теплостойкости полиэтилена, как указывалось в § 11, можно достигнуть и за счет радиоактивного облучения.

Полиэтилен применяют для изоляции высокочастотных кабелей радиолокационных и телевизионных установок, а также для других изделий высокочастотного диапазона.

Полиизобутилен — это полимер изобутилена:



имеющий строение



В зависимости от молекулярного веса (от 1000 до 400 000) полиизобутилен может быть как жидкостью, так и твердым каучукоподобным веществом. По сравнению с полиэтиленом он мягче, менее прочен механически, но еще более эластичен; относительное удлинение его перед разрывом может достигать 900%. Он обладает хорошей морозостойкостью. Полиизобутилен отличается значительной липкостью и склонностью к холодной текучести; для устранения этих недостатков к нему нередко примешивают более твердые полимеры. Свойства полиизобутилена приведены в табл. 26. По стойкости к химическим реагентам и малой гигроскопичности он близок к полиэтилену.

Полиизобутилен применяют при изготовлении высокочастотных кабелей в виде добавки к полиэтилену, а также для изолирующих компаундов и клеев.

Полистирол (см. § 12) получают из мономера стирола, который представляет собой легкую бесцветную синтетическую жидкость с характерным запахом. Стирол легко полимеризуется; даже при хранении на холоду, в темноте и при отсутствии катализаторов он

постепенно превращается в твердую, прозрачную и бесцветную, как стекло, массу. Свойства полистирола приведены в табл. 26.

В СССР выпускается полистирол различных марок:

1) масса для литья под давлением, являющаяся композицией эмульсионного полистирола с наполнителем, пластификатором и красителем;

2) эмульсионный полистирол — для получения литьевого материала методом горячего вальцевания и методом таблетирования с последующим прогревом;

3) блочный полистирол — для получения плит и трубок посредством горячего прессования и вытяжки.

Полистирол широко применяется в технике высоких и сверхвысоких частот как диэлектрик с малыми потерями: для каркасов катушек и других установочных деталей, панелей электронных ламп, для изоляции высокочастотных кабелей. Он используется также в виде лаков и компаундов, а также пленок для изготовления конденсаторов, имеющих весьма высокое сопротивление изоляции и малый угол потерь.

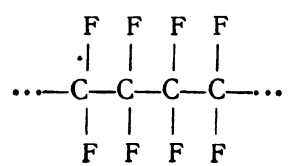
Недостатком полистирола является невысокая температура размягчения (табл. 26), которая тем выше, чем больше молекулярный вес полистирола. В ряде случаев изделия из полистирола обнаруживают склонность к постепенному образованию тончайших трещин; для борьбы с этим явлением, а также для уменьшения хрупкости полистирола к нему иногда прибавляют некоторые виды синтетических каучуков, но это приводит к повышению $\operatorname{tg}\delta$ материала.

Фторорганические материалы. Шагом вперед в усовершенствовании органических диэлектриков является создание веществ, в состав которых входит весьма активный химический элемент фтор (F), образующий чрезвычайно устойчивую связь с углеродом (энергия связи C — F составляет 107 *ккал/моль*),— фторуглеродов.

Фторуглероды имеют то же самое строение, что и соответствующие углеводороды, но в их молекуле вместо атомов водорода содержатся атомы фтора.

Большой интерес представляют фторорганические полимеры, отличающиеся особенно высокой теплостойкостью.

Политетрафторэтилен получается путем полимеризации тетрафторэтилена $F_2C{=}CF_2$ (этилен, в молекуле которого все четыре атома водорода замещены атомами фтора) и имеет строение:



Этот материал, выпускаемый в Советском Союзе под названием „фторопласт-4", обладает необычайно высокой для органического вещества теплостойкостью (до 300° С) и исключительной стойкостью к действию химических реагентов (так, на него совершенно не действуют серная, соляная, азотная и плавиковая кислоты, щелочи и т. п.; некоторое действие на него оказывают лишь расплавленные щелочные металлы и атомарный фтор при повышенных температурах). По стойкости к химически активным веществам фторопласт-4 превосходит золото и платину. Он совершенно негорюч, не растворяется ни в одном из известных растворителей, практически абсолютно негигроскопичен и не смачивается водой и другими жидкостями.

Высокую термо- и химическую стойкость фторопласта-4 по сравнению с углеводородами можно объяснить тем, что более крупные, по сравнению с атомами водорода, атомы фтора создают сильное поле, экранирующее углеродный скелет молекулы от внешнего воздействия (рис. 90). Сама по себе оболочка из атомов фтора также проявляет инертность по отношению к химическому воздействию из-за большой энергии связи С—F.

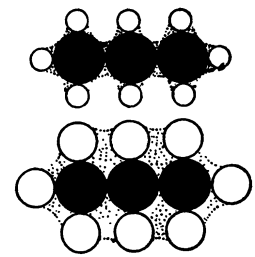


Рис. 90. Схематическое изображение молекул углеводорода (наверху) и фторуглерода (внизу).

Фторопласт-4 — белый или сероватый, наиболее тяжелый из всех полимеров материал. Он сравнительно мягок и обладает склонностью к холодной текучести. По своим электроизоляционным свойствам фторопласт-4 принадлежит к лучшим из известных нам диэлектриков, в особенности при условиях использования в полях высоких и сверхвысоких частот. Морозостойкость его характеризуется сохранением гибкости при очень низких температурах.

Свойства фторопласта-4 приведены в табл. 26.

Фторопласт-4 может в определенных условиях обрабатываться как пластическая масса; из него могут быть изготовлены различные фасонные изделия, листы, гибкие пленки, изоляция кабельной продукции и т. п.

Высокие электроизоляционные свойства фторопласта-4 позволяют применять его в наиболее ответственных случаях, при одновременном воздействии на изоляцию весьма высоких или весьма низких температур, химически активных сред, влаги и т. п.

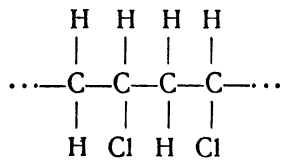
Широкому внедрению фторопласта-4 пока препятствует его высокая стоимость и сложность технологии. Следует отметить, что при температурах выше +400° С фторопласт-4 начинает подвергаться разложению с выделением газообразного фтора, весьма ядовитого и химически активного.

Подобный фторопласту-4 материал выпускается за рубежом под названием тефлона.

Пластмассы с повышенными диэлектрическими потерями (полярные)

Полихлорвинил — твердый продукт полимеризации газообразного хлорвинила $H_2C{=}CH{-}Cl$, представляющего собой этилен, в молекуле которого один атом H замещен атомом Cl. Название хлорвинил происходит от термина „винил" для группы атомов $H_2C{=}CH{-}$ (стирол может быть назван винилбензолом).

Полихлорвинил имеет состав $(C_2H_3Cl)_n$ и следующее строение:



Из-за асимметрии строения молекул (за счет наличия в них атомов хлора) этот материал является полярным диэлектриком. Поэтому

Таблица 26

Основные характеристики неполярных пластических материалов

Свойства	Единицы измерения	Полиэтилен	Полиизобутилен	Полистирол	Фторопласт-4
Плотность	$г/см^3$	0,95	0,9—0,95	1,05	2,3
Водопоглощение за 24 часа	%	Очень мало	Очень мало	Очень мало	Практически отсутствует
Теплостойкость	°C	110	~ 100	80 — 85	~ 300
Морозостойкость	°C	—60 ÷ —70	— 75	—40 ÷ —50	— 195
Предел прочности:					
при растяжении	$кГ/см^2$	100	20 — 100	350 — 400	150 — 300
при изгибе	„	—	—	800 — 900	110 — 140
Удельная ударная вязкость	$\frac{кГ \cdot см}{см^2}$	больше 100	—	12 — 18	больше 100
Удельное объемное электросопротивление	$ом \cdot см$	$10^{16} — 17^{17}$	$10^{15} — 10^{16}$	$10^{15} — 18^{18}$	$10^{16} — 10^{18}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	2,3 — 2,4	2,2 — 2,3	2,5 — 2,6	1,9 — 2,2
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 *гц*	—	0,0002 — 0,0003	0,0003 — 0,0006	0,0002 — 0,0005	0,0002 — 0,0003
Пробивная напряженность	*кв/мм*	40 — 150*	15 — 25	20 — 200*	50 — 250*

* Верхние пределы — для материалов в виде пленки.

полихлорвинил имеет пониженные электроизоляционные свойства по сравнению с нейтральными полимерами (так, при нормальной температуре tgδ чистого полихлорвинила примерно в 100 раз выше, чем полистирола).

Зависимости ε′ и tgδ от температуры полихлорвинила показаны на рис. 91.

Влажность мало сказывается на величине удельного объемного электросопротивления полихлорвинила (ρ полихлорвинила даже при 90% относительной влажности воздуха более 10^{14} *ом · см*), но более резко влияет на удельное поверхностное сопротивление. Полихлорвинил стоек к действию воды, щелочей, разбавленных кислот, масел, бензина и спирта.

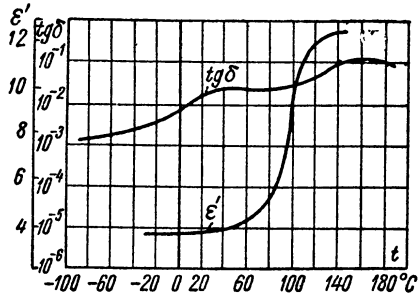


Рис. 91. Зависимость ε′ и tgδ полихлорвинила от температуры при частоте 1 *Мгц*

Этот материал широко используется в технике и в быту для изготовления разнообразных пластмасс и резиноподобных продуктов, в частности для изоляции телефонных и других проводов, для защиты оболочек кабелей, для аккумуляторных баков и т. п. Из него изготовляют также искусственное волокно. Для повышения эластичности и морозостойкости полихлорвинила к нему обычно прибавляют пластификаторы, представляющие собой трудно испаряющиеся органические жидкости.

Для целей электрической изоляции выпускается пластикат марок: ПХВ-I и ПХВ-II, незначительно отличающихся друг от друга по механической прочности и эластичности.

Свойства полихлорвинилового пластиката приведены в табл. 27.

Винипласт — листовой или трубчатый, тепло- и химически стойкий, упругий материал, полученный путем прессования разогретых полихлорвиниловых пленок. Сваривается, может быть склеен, в том числе и с металлами.

Свойства винипласта приведены в табл. 27.

Полиметилметакрилат, т. е. полимер метилметакрилата

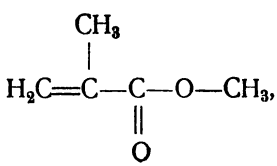


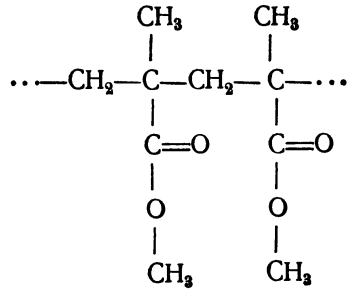
Таблица 27

Основные характеристики полярных пластических материалов

Свойства	Единицы измерения	Полихлорвиниловый пластикат	Винипласт	Плексиглас	Лавсан (плёнка)	Капрон	Полиамид 68	Полиуретан	Фторопласт-3
Плотность	*г/см*³	1,2—1,6	1,4	1,2	1,4	1,1—1,2	1,15	1,2	2,15
Водопоглощение за 24 часа	%	Мало	Мало	0,5	0,1	0,5	0,5	0,1	Очень мало
Теплостойкость	°С	60—80	65*	70*	250	110	120	120—130	200
Морозостойкость	°С	—35÷—60	—50	—180	—100	—30÷—40	—50	—30÷—40	—200
Предел прочности: при растяжении	*кГ/см*²	100—200	400—500	500—750	1000—2000	600	450—500	500—600	350—400
при изгибе	»	—	900	600—1100	—	—	700—900	700—800	600—800
Удельная ударная вязкость	*кГ/см*	—	100—120	15—30	—	—	100	100	30—150
Удельное объемное электросопротивление	*ом·см*	10^{14}—10^{15}	10^{14}—10^{15}	10^{13}—10^{14}	10^{14}—10^{16}	10^{13}	10^{13}	10^{13}—10^{14}	10^{16}—10^{17}
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	3,5—4,5	3,5—4,3	2,8—3,5	3—3,5	5—6	4—5	4,5—5	3
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 *гц*	—	0,01—0,05	0,01	0,02—0,03	0,002—0,02	0,06	0,03	0,02—0,03	0,01—0,02
Пробивная напряженность	*кв/мм*	10—50	15—20	18—40	30—120	20	25—30	20—25	15—20

* Теплостойкость по Мартенсу.

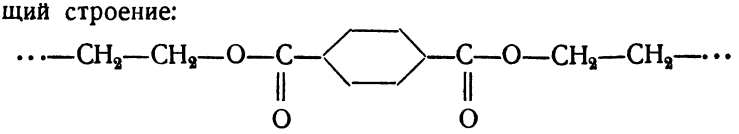
имеет строение:



Это — прозрачный и бесцветный материал, называемый иногда органическим стеклом или плексигласом; он широко применяется как конструкционный материал. Выпускается в виде пресспорошков марок Л-1 и Л-2, а также в форме блоков, листов разной толщины, трубок и стержней различного диаметра, изделия из которых получают путем механической обработки. Хорошо поддается обработке и надежно склеивается дихлорэтаном. Из плексигласа изготовляют изделия сложной формы, например линзы для телевизоров.

Характеристики плексигласа приведены в табл. 27.

Полиэтилентерефталат (лавсан) — это термопластичный полимер, полученный из этилена и терефталевой кислоты $C_6H_4(COOH)_2$, имеющий строение:

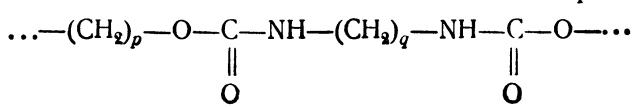


при молекулярном весе порядка 30 000. Он имеет значительную механическую прочность и высокую температуру размягчения. Это — дипольный диэлектрик.

Свойства лавсана даны в табл. 27.

Полиэтилентерефталат применяется для изготовления волокон, пленок и для других целей. При повышенных температурах он энергично окисляется на воздухе, так что обработка размягченного нагревом материала должна производиться в атмосфере нейтрального газа (азота). Из этого материала можно получать тонкие пленки для межслойной изоляции в обмотках трансформаторов, дросселей и подобных изделий, рассчитанных на рабочую температуру от — 60 до + 150° С. Пленки из лавсана с особенно высокой механической прочностью имеют толщину около 6,5 *мкм*. Конденсаторы из таких пленок отличаются более высокой рабочей температурой (до 150° С) по сравнению с бумажными и меньше последних по размерам.

Полиамидные смолы также имеют линейное строение молекул:



и являются термопластичными веществами. Они отличаются высокой механической прочностью и эластичностью, растворимы лишь в ограниченном числе растворителей (в частности в крезоле и расплавленном феноле); применяются для изготовления искусственных волокон, пленок и пластических масс.

Из этих смол в Советском Союзе особенно широко применяется капрон, в составе которого $p = q = 5$.

Свойства капрона приведены в табл. 27.

Большое значение имеет также нейлон ($p = 6$; $q = 4$) с более высокой температурой размягчения (240—255° С), чем у капрона.

Полиамид 68 выпускается в виде полупрозрачных, бесцветных или светло-коричневых гранул.

Перерабатывается эта смола в изделия методом литья под давлением при температуре 240 — 260° С.

Смола отличается высокими механическими и вполне удовлетворительными электрическими свойствами, устойчивостью к истиранию, хорошим сцеплением с материалами. Рекомендуется для изготовления деталей с герметично опрессованной металлической арматурой, штепсельных разъемов, ламповых панелей, корпусов точных переменных сопротивлений и других изделий, которые эксплуатируются при температуре от —60 до +100° С.

Кроме рассмотренных выше, в настоящее время изготовляются еще ряд других полиамидных материалов.

Полиуретан — термопластичный литьевой материал на основе полиамидов. Выпускается марки ПУ-1 в виде белого порошка. Перерабатывается в изделия методом литья под давлением при температуре 180—185° С.

Изделия из смолы ПУ-1 могут работать при высокой влажности и температуре до 100—110° С длительное время без существенного изменения физико-механических свойств. Полиуретановая смола применяется для герметизации специальных видов керамических, бумажных и других конденсаторов.

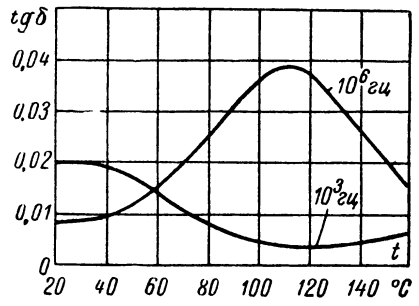


Рис. 92. Зависимость tg δ фторопласта-3 от температуры.

Характеристики полиуретана приведены в табл. 27.

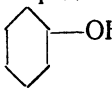
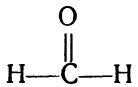
Фторопласт-3 относится к полярным фторорганическим полимерам (полимер трифторхлорэтилена $F_2C = CFCl$) с большей жесткостью, чем фторопласт-4. Электрические свойства и химическая стойкость фторопласта-3 ниже, чем у фторопласта-4, но технологически получить его проще и он более дешевый.

Характеристики фторопласта-3 приведены в таблице 27 и на рис. 92.

Композиционные порошковые пластические массы

Композиционные порошковые пластмассы, предназначенные для получения изделий методом прессования горячим прессом или литья под давлением, состоят из связующего вещества (искусственные смолы) и наполнителей (древесная мука, очесы хлопчатника, каолин, кварцевый песок, асбестовое или стеклянное волокно и т. д.). Кроме того, в массу добавляются красители и для придания наилучших технологических свойств — пластификаторы.

В качестве связующего вещества используются феноло-формальдегидные, крезоло-формальдегидные, анилино-формальдегидные, карбамидо-формальдегидные, меламино-формальдегидные и фурфурольные смолы. На основе этих смол с различными наполнителями наша промышленность в настоящее время выпускает более 60 марок порошков с различными свойствами, нашедших применение для производства тех или иных деталей радиоэлектронной аппаратуры.

В качестве примера связующего вещества рассмотрим феноло-формальдегидную смолу. Феноло-формальдегидные смолы изготовляются посредством нагревания в закрытом котле водного раствора фенола  и формальдегида  в присутствии катализатора. В результате протекания реакции поликонденсации выделяется и осаждается на дно котла коричневая масса, представляющая собой готовую смолу.

Феноло-формальдегидные смолы могут быть изготовлены как термореактивными, так и термопластичными. Если в реакции участвует не менее одного моля формальдегида на моль фенола, получается термореактивная смола — бакелит. При изготовлении бакелита берется щелочной катализатор, обычно аммиак. В результате в смоловарочном котле из фенола и формальдегида получается бакелит в стадии А (резол); он обладает плавкостью (температура размягчения 55 — 80° С) и легко растворяется в спирте.

При нагреве резол подвергается дополнительной полимеризации; при этом через обладающую промежуточными свойствами стадию В (резитол) переходит в окончательную стадию С (резит). Переход из стадии А в стадию С практически требует температуры не ниже 110 — 140° С, причем чем выше температура, тем быстрее совершается переход; при температуре 160° С он происходит всего за 1—3 *мин.* Повышение давления также ускоряет запекание бакелита. В отличие от бакелита А бакелит С совершенно неплавок (при нагревании до высокой температуры он может лишь обуглиться и сгореть) и не растворяется ни в спирте, ни в других растворителях. Таким образом, ясно, что бакелит является типичным термореактивным веществом.

Бакелит (мы имеем в виду бакелит в стадии С, в которой он находится в готовой используемой изоляции) обладает повышенной

механической прочностью. Он мало эластичен и не отличается высокой стойкостью к действию воды; отрицательным свойством его является склонность к обугливанию — образованию на поверхности проводящих электрический ток следов при воздействии поверхностных электрических разрядов. Бакелит широко применяют при изготовлении пластических масс, в том числе слоистых — гетинакса, текстолита и др.

Если при варке смолы из фенола и формальдегида взять иное соотношение их количеств (меньше одного моля формальдегида на моль фенола) и применить не щелочной, а кислотный катализатор (например соляную кислоту), то получается смола типа новолака. Новолак является термопластичной смолой и после нагрева сохраняет плавкость и растворимость в спирте. Он применяется для изготовления порошковых пластических масс, в которые для перевода новолака в стадии, подобные бакелитовым, добавляется уротропин.

Феноло-формальдегидные смолы, вследствие наличия в их молекулах гидроксильных групп — OH, полярны. Электрические свойства бакелита в стадии А невысоки (ρ порядка 10^8 *ом·см*); при запекании смолы они улучшаются: для бакелита С величина ρ — около 10^{13} *ом·см*; $\varepsilon' = 4 \div 4{,}5$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}01$. Плотность бакелита С — 1,25*г/см*^{3}; водопоглощаемость 0,1%.

Крезольные смолы ($CH_3C_6H_4OH$) имеют менее выраженные полярные свойства по сравнению с фенольными.

При замене фенола (в реакции с формальдегидом) анилином $C_6H_5 \cdot NH_2$ получаются анилино-формальдегидные смолы. Их полярные свойства выражены еще слабее, так как группа — NH_2 менее полярна, чем группа — OH; это способствует уменьшению гигроскопичности. Применяемая в высокочастотной изоляции чистая анилино-формальдегидная смола совенит имеет: $\varepsilon' = 3{,}6 \div 4{,}5$ и $\operatorname{tg}\delta = 0{,}002$ при частоте 1 *Мгц*.

Карбамидо-формальдегидные и меламино-формальдегидные смолы изготовляют методом поликонденсации формальдегида с карбамидом $(NH_2)_2CO$, с меламином $C_3H_6N_6$ и их производными. Эти смолы обладают сравнительно высокой стойкостью к действию электрических разрядов и высокой клеящей способностью; они используются для изготовления пластических масс, лаков, клеев и т. п.

Процесс производства изделий из пресспорошков осуществляется в разборных пресс-формах, изготовленных из твердых инструментальных сталей, хромированных изнутри с целью предохранения от прилипания порошка.

Изготовив один раз пресс-форму необходимых размеров и конфигурации, мы можем отпрессовать в ней большое количество изделий, точно повторяющих очертания внутренней полости пресс-формы.

При массовом производстве изделий одинаковой формы и размеров применение пластических масс обеспечивает весьма большую производительность труда и снижение стоимости готовых изделий.

Пресспорошки, содержащие наполнитель, могут изготовляться либо сухим способом, т. е. измельчением и перемешиванием наполнителя и связующего в твердом состоянии, либо мокрым (лаковым) способом, т. е. предварительной пропиткой наполнителя раствором связующего вещества в подходящем растворителе, последующим нагревом для испарения растворителя и измельчением полученного материала.

Лаковый способ требует расходования растворителя, но в ряде случаев обеспечивает лучшую однородность пресспорошка; иногда вместо лака, т. е. раствора связующего в органическом растворителе, применяют водную эмульсию связующего вещества.

При изготовлении пресспорошков применяют разнообразное оборудование: мельницы, мешалки, вальцы, вакуумные сушилки, сита для просеивания готового порошка и др.

Прессование изделий из пластмасс обычно производят на гидравлических прессах, обеспечивающих создание достаточно

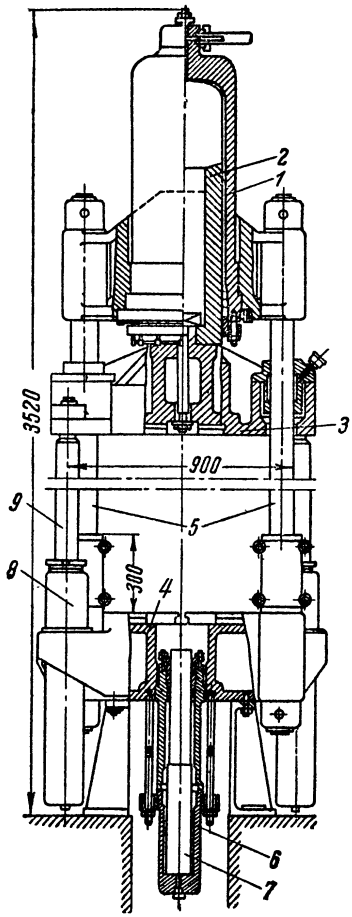


Рис. 94. Стопятидесятитонный гидравлический пресс для прессования фасонных изделий из пластических масс (в разрезе).

1 — рабочий цилиндр, в который подается под давлением вода; *2* — рабочий плунжер, передающий давление на подвижную плиту; *3* — подвижная плита; *4* — стол пресса — неподвижная плита; *5* — колонны; *6* — выталкивающий цилиндр; *7* — выталкивающий плунжер, служащий для выталкивания из пресс-формы отпрессованного изделия; *8* — цилиндр обратного действия; *9* — плунжер обратного действия, поднимающий подвижную плиту по окончании прессования.

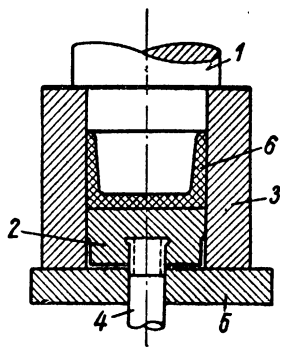


Рис. 95. Пример конструкции пресс-формы.

1 — верхний пуансон; *2* — нижний пуансон; *3* — матрица; *4* — выталкиватель; *5* — плита пресса; *6* — изделие.

большого давления (рис. 94). В пресс-форму засыпают отвешенное количество пресспорошка и ставят ее на нижнюю плиту пресса. Затем плиты пресса сближают и на находящийся внутри пресс-формы пресспорошок дают давление. Если требуются одновременно нагрев и давление, то пластины пресса или сама пресс-форма снабжаются электронагревательным устройством. По окончании прессования снимают давление, разводят плиты пресса и вынимают из пресс-формы готовое изделие.

На рис. 95 показана конструкция пресс-формы для изготовления несложной детали. В данном случае пресспорошок засыпают в пространство, ограниченное матрицей и нижним пуансоном; при сведении плит пресса верхний пуансон входит в отверстие матрицы до упора. По окончании прессования готовое изделие удаляют из пресс-формы с помощью выталкивателя.

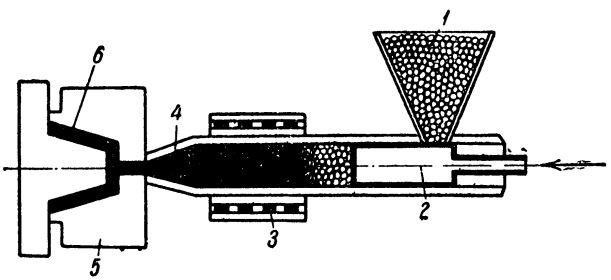


Рис. 96. Схема изготовления изделий из пластмасс методом литья под давлением.

1— бункер для засыпки пресспорошка; *2*— поршень; *3*— нагревательный элемент; *4* — размягченная масса; *5*— пресс-форма; *6*— прессуемое изделие.

При конструировании пресс-формы необходимо учитывать, что объем, занимаемый пресспорошком, значительно больше объема готового изделия.

Для уменьшения размеров пресс-формы, улучшения теплопроводности пресспорошка и получения более строгой дозировки часто применяют таблетирование, т. е. предварительно прессуют (при небольшом давлении и без нагрева) таблетки из заданной порции порошка. С целью сокращения времени нагрева в пресс-форме таблетки перед закладкой их в пресс-форму подогревают в термостате (хорошие результаты дает подогрев в поле высокой частоты).

Все операции технологического процесса прессования: отвешивание пресспорошка, таблетирование, закладка таблеток в пресс-форму, разогрев, подача давления, выдержка в пресс-форме, удаление готовых изделий и т. д. — при массовом производстве автоматизируются.

Описанный выше способ прессования обычен при изготовлении изделий из термореактивных пластмасс. Для получения изделий из термопластических материалов часто используют способ литья под

давлением; материал подогревают и размягчают вне пресс-формы и затем вдавливают в нее.

Рис. 96 поясняет принцип литья под давлением. Этот способ применим и для термореактивных материалов при малых количествах засыпаемого в бункер пресспорошка.

Для термопластичных материалов применяют также шприцевание, т. е. непрерывный процесс выдавливания с помощью червяка (шнека) размягченной нагревом массы через наконечник нужной формы. Этот способ дает возможность изготовления стержней, лент, труб, кабельных оболочек и тому подобных изделий, имеющих неизменное поперечное сечение по всей длине.

Многие термопластичные пластмассы могут хорошо соединяться сваркой наподобие металлов. Нагрев при сварке пластмасс осуществляется струей горячего воздуха; с успехом используется сварка с применением нагрева в поле высокой частоты.

Применяется также склеивание пластмасс друг с другом и с другими материалами при помощи соответствующих клеев.

Свойства отпрессованных изделий зависят от состава пластмассы и от режима прессования.

Для большинства феноло-и крезоло-формальдегидных пресспорошков применяется следующий режим прессования:

удельное давление на материал в пресс-форме	250—300 *кГ/см*^{2}
температура пресс-формы	160—165° С
время выдержки в горячей пресс-форме под давлением	0,5—1 *мин/мм*

Толщина стенки изделия для расчета времени выдержки берется в наиболее толстом месте. Свойства материалов этого типа в отпрессованном состоянии приведены в табл. 28.

Детали из фенопластов и других термореактивных пластмасс отличаются стабильностью свойств при условии нормального режима прессования. Для повышения электроизоляционных свойств и стабильности размеров полезно в ряде случаев прогревать детали без давления при температуре 100—110° С в течение 8—12 *час.*

Как видно из данных табл. 28, изменяя смолу и наполнители, можно в широких пределах менять свойства прессматериалов. Анилино-формальдегидные пластмассы можно получать с наилучшими значениями тангенса угла диэлектрических потерь по сравнению с другими подобными пластиками. Аминопласты ценны тем, что позволяют придавать им любую яркую окраску, тогда как феноло-формальдегидные пластмассы из-за темно-коричневого цвета самой смолы окрашивают только в коричневый или черный цвета. Коричневый краситель вводят, как правило, в пресспорошки с повышенными электрическими характеристиками.

Свойства фурфурольных и других прессматериалов не приведены, так как они близки к данным в табл. 28. Фурфурольные пластики отличаются повышенной теплостойкостью (по Мартенсу — до 320° С)

Таблица 28

Основные характеристики отпрессованных образцов из термореактивных пластмасс

Свойства	Единица измерения	Пластмассы на основе		
		феноло- и крезолоформальдегидных смол	анилино-формальдегидной смолы	меламино-формальдегидной смолы (аминопласты)
Плотность	*г/см³*	1,4—2	1,2—1,25	1,4—1,8
Водопоглощение за 24 часа	%	0,05—2,5	0,05	0,1—0,7
Теплостойкость по Мартенсу	°С	100—250	100—130	100—150
Предел прочности при изгибе	*кГ/см²*	400—2000	900—1200	500—800
Удельная ударная вязкость	*кГ·см/см²*	4—40	10—25	4—10
Удельное объемное электросопротивление	*ом·см*	10^{9}—10^{14}	10^{13}—10^{14}	10^{10}—10^{13}
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^{6} *гц*	—	0,01—0,5	0,0015—0,006	0,0025—0,05
Пробивная напряженность	*кв/мм*	5—17	10—16	12—16

Таблица 29

Свойства пенопластов

Свойства	Единица измерения	Марки			
		ПС	ПХВ	ФФ и ФК	К-40
Объемный вес	*г/см³*	0,05—0,22	0,1—0,2	0,1—0,23	0,25
Коэффициент теплопроводности	*вт/см·град*	0,0005	0,0005	0,0006	0,0006
Рабочая температура	°С	$-60 \div +60$	$-60 \div +60$	$\leqslant +120$	$\leqslant +250$
Предел прочности: при растяжении	*кГ/см²*	10—42	20—45	8—18	—
при сжатии	»	5—45	8—12	20—40	12
Удельная ударная вязкость	*кГ·см/см²*	0,8—1,8	0,7—1,9	0,2—2,2	0,19
Относительная диэлектрическая проницаемость при 10^{10} *гц*	—	1,1—1,25	1,8	1,3	1,3
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^{10} *гц*	—	0,0001—0,0003	0,015	0,01—0,05	0,003

и механической прочностью (удельная ударная вязкость — порядка 100 $кГ \cdot см/см^2$).

Пенопласты. Для радиотехнических целей наиболее интересны пенопласты следующих марок:

ПС — на основе полистирола;

ПХВ — на основе полихлорвиниловой смолы;

ФФ и ФК — на основе феноло-формальдегидной смолы и каучука;

К-40 — на основе кремнийорганической смолы (см. § 17).

Свойства пенопластов приведены в табл. 29.

§ 14. Пропиточные материалы, компаунды, лаки и клеи

Рассматриваемые в настоящем параграфе материалы являются жидкими в технологическом процессе изготовления электроизоляционных изделий и переходят в твердое состояние после его завершения.

Пропиточные материалы включают в себя нефтепродукты и многие смолы.

Конденсаторное масло применяют для заливки и пропитки секций бумажных конденсаторов. Оно представляет собой смесь жидких углеводородов, в основном нафтенового ряда. Кроме того, масло содержит углеводороды ароматического и метанового рядов.

Конденсаторное масло является нефтяным продуктом. В процессе перегонки нефти вначале отгоняют легкие бензиновые и керосиновые фракции. Остаток носит название мазута. При дальнейшей перегонке мазута выделяют масляные фракции, остаток после отгонки

Таблица 30

Основные характеристики пропиточных материалов

Свойства	Единица измерения	Конденсаторное масло	Вазелин	Битумы	Церезин	Канифоль	Фторорганическая жидкость
Плотность . . .	$г/см^3$	0,88	0,8—0,9	~1	0,9—0,95	1,05—1,1	2
Удельное объемное электросопротивление при $t = 20 \pm 5°C$	$ом \cdot см$	10^{14}—10^{15}	10^{15}—10^{16}	10^{15}—10^{16}	10^{15}—10^{17}	10^{14}—10^{15}	10^{14}
Относительная диэлектрическая проницаемость . . .	—	2,1—2,3	2,2	2,5—3	2,2	3	2
Тангенс угла потерь при 10^6 $гц$	—	0,0004—0,0008	0,0004	0,01	0,0002	0,01	0,0003
Пробивная напряженность	$кв/мм$	20—25	20—25	10—25	15—20	10—15	15—20

которых представляет собой черное аморфное вещество, называемое нефтяным гудроном. Путем тщательной очистки первых масляных фракций получают конденсаторное масло.

Оно представляет собой слабовязкую, практически нейтральную жидкость, основные характеристики которой приведены в табл. 30. Вязкость масла при 20° С составляет 4—5 градусов Энглера; температура вспышки в закрытом тигле — не ниже 135° С, а температура застывания — не выше —45° С.

Нефть различных месторождений отличается по своему составу и качеству. Поэтому масла, полученные из разных нефтей, имеют индивидуальные особенности.

Вазелин представляет собой полужидкий нейтральный продукт, получаемый из нефти. Он нашел применение в производстве конденсаторов постоянного напряжения в качестве пропитывающего вещества. Свойства вазелина приведены в табл. 30. Вязкость вазелина при 60° С в градусах Энглера должна быть не менее 4. Температура застывания вазелина 35—50° С.

Кроме того, находят применение искусственные вазелины с электрическими характеристиками, не уступающими характеристикам естественного вазелина, но с повышенной теплостойкостью.

Битумы — группа аморфных термопластичных, слабополярных материалов, представляющих собой сложные смеси углеводородов (обычно они содержат также небольшие количества кислорода и серы), обладающих характерным комплексом свойств. Они имеют черный (или темно-коричневый) цвет, при достаточно низких температурах становятся хрупкими. Растворяются в углеводородах, лучше в ароматических (бензол, толуол и др.), несколько хуже в бензине; немаслостойки. В спирте и воде битумы нерастворимы; они имеют ничтожно малую гигроскопичность и в толстом слое практически не пропускают сквозь себя воду.

По происхождению различают битумы искусственные (нефтяные гудроны), представляющие собой тяжелые продукты перегонки нефти, и природные (ископаемые), называемые также асфальтами.

Залежи асфальтов всегда связаны с нефтяными месторождениями, так как в природных условиях асфальты также образовались из нефти. Асфальты обычно бывают загрязнены минеральными примесями.

Нефтяные битумы согласно ГОСТ 1544-52 различают пяти марок со следующей температурой размягчения:

Марка 1 . . .	не ниже 30° С	Марка 4 . . .	не ниже 70° С
„ 2 . . . „	„ 40° С	„ 5 . . . „	„ 90° С
„ 3 . . . „	„ 50° С		

Особо тугоплавкие спецбитумы могут иметь температуру размягчения 110—140° С, а некоторые асфальты — даже до 160—175° С.

Более тугоплавкие битумы, как правило, имеют лучшие электроизоляционные свойства; они труднее растворимы и при низких тем-

пературах более тверды и хрупки. Температура размягчения битума в случае надобности может быть существенно повышена продувкой, т. е. пропусканием через расплавленный битум воздуха. Для продувки битум расплавляют в открытом стальном котле и доводят его температуру до 255 ÷ 280° С, после чего сквозь слой битума пропускают под давлением воздух. Повышение температуры размягчения при этом происходит частично за счет испарения масел, входящих как примесь в состав битума, частично за счет окисления и дополнительной полимеризации битума.

Если, наоборот, температуру размягчения битума требуется снизить, то это легко может быть достигнуто сплавлением битума с небольшим количеством нефтяного масла. Добавление нефтяного масла улучшает морозостойкость битума.

Свойства битумов приведены в табл. 30.

Битумы широко используются для изготовления компаундов; они входят в состав ряда электроизоляционных лаков.

Церезин и парафин представляют собой неполярные, термопластичные, кристаллические вещества, состоящие из смеси предельных углеводородов C_nH_{2n+2}. У церезина $n \approx 39 \div 53$, у парафина $n \approx 10 \div 36$. Кроме того, молекулы церезина имеют сильно разветвленную цепь углеродных атомов, в отличие от прямых слабо разветвленных цепей молекул парафина. Вследствие этого температура плавления церезина $\sim 75°$ С, а у парафина — только 52° С. Из-за низкой температуры плавления и быстрой окисляемости при нагреве применение парафина в современной аппаратуре крайне ограничено.

Церезин, как и парафин, может быть получен из некоторых сортов нефти, но обычно его изготовляют очисткой воскообразного материала озокерита („горного воска"), представляющего собой продукт естественного перерождения нефти в условиях доступа воздуха. Месторождения озокерита расположены в нефтеносных районах.

Для извлечения озокерита добытую породу вываривают в котлах с кипящей водой, причем озокерит вытапливается и всплывает на поверхность. Для получения церезина озокерит подвергают очистке серной кислотой или адсорбентами, после чего темно-коричневый цвет исходного продукта сменяется на оранжевый, светло-желтый или белый.

Свойства церезина приведены в табл. 30.

Синтетические парафины и синтетические церезины. Необходимость повышения рабочих температур конденсаторов привела к разработке синтетических материалов с температурой плавления 100—130° С. Они представляют собой высокомолекулярные углеводороды, полученные в качестве побочных продуктов при изготовлении синтетического бензина и масел.

Канифоль — естественная смола, хрупкая, желтого или коричневого цвета, получается из живицы (природной смолы хвойных деревьев, главным образом сосны) посредством отгонки ее жидких составных частей (скипидара).

Канифоль состоит в основном из органических кислот (а б и е т и н о в о й $C_{20}H_{30}O_2$ и др.); соли этих кислот, получающиеся при нагреве канифоли с металлами или их окислами, называются р е з и н а т а м и.

Канифоль растворима в нефтяных маслах (особенно при нагреве) и других жидких углеводородах, растительных маслах, спирте, скипидаре и др.

Свойства канифоли даны в табл. 30.

Температура размягчения различных сортов канифоли составляет 40—60° С. На воздухе канифоль постепенно окисляется, причем температура размягчения повышается, а растворимость понижается. В электропромышленности канифоль в больших количествах применяется в виде растворов в нефтяных маслах в качестве пропиточных и заливочных кабельных компаундов. Особое значение канифоль имеет при пайке проводников в радиоаппаратуре и приборах, так как при температуре порядка 150° С она хорошо растворяет окислы меди.

Ф т о р о р г а н и ч е с к и е ж и д к о с т и представляют интерес в качестве заливки конденсаторов, используемых при температурах в пределах 150° С. Они отличаются большой теплопроводностью, превосходящей в четыре раза теплопроводность обычных пропиточных материалов, и практически не меняют своих свойств при нагревании до указанных температур.

Свойства фторорганических жидкостей приведены в табл. 30.

Компаундами называют смеси различных изоляционных веществ (смол, битумов, эфиров, целлюлозы и т. д.), которые переводятся в жидкое состояние чаще всего путем разогрева до достаточно высокой температуры. Затвердевание происходит при охлаждении расплавленного компаунда. Однако в последнее время стали применяться компаунды, отверждающиеся при комнатной температуре вследствие полимеризации за счет вводимых в их состав специальных отвердителей. Для придания компаунду нужных свойств (повышенной теплопроводности, улучшения электрических характеристик) в него могут быть введены наполнители — кварцевая мука, тальк и др.

По назначению различают две основные группы компаундов: п р о п и т о ч н ы е и з а л и в о ч н ы е. Последние служат для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями для защиты изоляции от увлажнения, для увеличения разрядного напряжения, для улучшения отвода тепла и т. д.

Свойства данного вида компаунда и технология его применения определяются его составом; поэтому, зная состав компаунда, можно заранее судить о его свойствах и возможностях использования и, наоборот, можно подобрать состав компаунда для получения комплекса свойств, требующихся в данном случае применения.

Рассмотрим некоторые из применяющихся компаундов.

Термопластичный компаунд ЦКП-3 состоит из 87 весовых частей церезина, 10 частей канифоли и 3 частей полиизобутилена.

Термопластичный компаунд КЦ состоит из 70% церезина и 30% канифоли.

Масса РГЛ, состоящая из полиэфиров и искусственных смол, отверждается с помощью уротропина или других отвердителей и переходит в термореактивное состояние. Она предназначается для заливки катушек и других деталей аппаратуры.

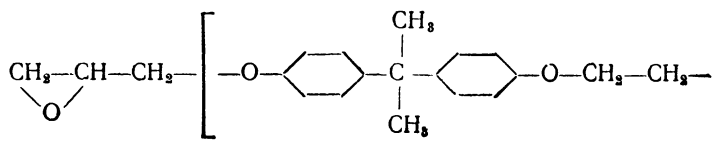
Компаунд КГМС представляет собой композицию из полиэфиров со стиролом и специальными добавками. При нагревании до 80—100° С образует твердый полимер светло-желтого или коричневого цвета. Он применяется для заделки катушек, трансформаторов и других деталей.

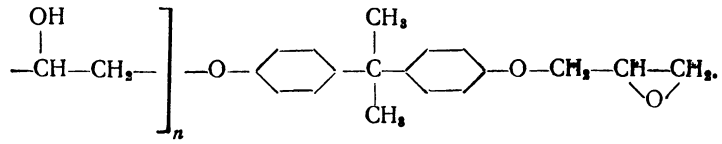
Компаунды МБК являются пропиточными и заливочными термореактивными веществами на основе акриловых и метакриловых эфиров. В исходном состоянии представляют собой прозрачные бесцветные или слабо-желтые жидкости, затвердевающие без введения дополнительных компонентов при нагреве в течение 10—18 *час* и температуре 70—75° С или с соответствующими добавками при комнатной температуре за 6—12 *час*. В компаунды МБК могут вводиться наполнители: пылевидный кварц, тальк и другие. Применяются для герметизации обмоток и блоков радиоаппаратуры, работающих в условиях высокой влажности. Процесс холодного отверждения компаундов имеет особое значение при герметизации электрических узлов с полупроводниковыми элементами, не допускающими применения повышенных температур, а также для защиты крупногабаритных блоков.

Компаунды на основе полиуретанов представляют собой бледно-желтые вещества с хорошей морозостойкостью, прочно сцепляющиеся с металлами. Отверждаются при температуре 60—80° С в течение 2—7 *час* или при комнатной температуре в течение 2—4 суток. Для улучшения характеристик рекомендуется прогрев их при 120° С в течение 6—16 *час*. Применяются для пропитки и заливки высоковольтных трансформаторов, селеновых выпрямителей, отклоняющих и фокусирующих устройств, конденсаторов и других деталей.

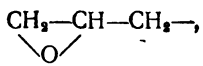
Эпоксидные смолы являются новыми перспективными электроизоляционными материалами, выпускаемыми в СССР под марками ЭД-6, ЭД-5, Э-40, Э-37. Эпоксидные смолы представляют собой продукты поликонденсации хлорированных глицеринов с двухатомными фенолами в щелочной среде. Наиболее распространенной является смола, получаемая при взаимодействии эпихлоргидрина глицерина с дифенилолпропаном (дианом), называемая обычно диановой.

Структурная формула диановой смолы следующая:





Концевые группы



называемые эпокси-группами, характерны для любой разновидности эпоксидной смолы. В зависимости от количественного соотношения реагирующих компонентов и условий проведения реакции образующиеся смолы представляют собой окрашенные жидкие или густовязкие продукты различного молекулярного веса.

Эпоксидная смола как таковая не обладает технически ценными свойствами и не представляет поэтому интереса для практического использования. Однако эпоксидные смолы под влиянием некоторых веществ, называемых отвердителями, на холоду или при нагревании способны претерпевать такое физическое изменение, которое делает их вполне пригодными для практического применения.

В качестве отвердителей обычно применяют амины или ангидриды кислот. Наиболее распространенными отвердителями из аминов являются гексаметилендиамин, полиамины, метафенилендиамин и др.; из ангидридов — малеиновый и фталевый. В случае применения аминов затвердевание эпоксидной смолы протекает при более низких температурах, тогда как использование ангидридов кислот требует обязательного нагревания до температуры выше 100° С.

Эпоксидные смолы обладают малой усадкой при затвердевании, а после затвердевания — высокими физико-механическими свойствами, исключительной адгезией (т. е. прочностью прилипания) к различным металлическим и неметаллическим поверхностям и весьма высокими влагозащитными свойствами.

С целью повышения механической прочности в эпоксидные смолы часто вводят различные наполнители, например кварцевую и слюдяную муку, двуокись титана, мрамор и другие. Введением пластификаторов (трикрезилфосфата, дибутилфталата и других) увеличивается эластичность этих смол.

Особенно широкое применение эпоксидные смолы находят в виде компаундов, используемых для пропитки и заливки отдельных узлов электро- и радиоаппаратуры. В частности, такие компаунды применяются для компаундирования открытых конструкций трансформаторов накала магнетронов и тиратронов, анодных, импульсных трансформаторов, блоков схем, проходных и опорных изоляторов, различных видов конденсаторов и т. д. Кроме того, эпоксидные смолы используются для изготовления покровных лаков, высокопрочных клеев и пластмасс.

Таблица 31

Свойства компаундов

Свойства	Единица измерения	ЦК-П 3	КЦ	РГЛ	КГМС	МБК	Полиуретановый компаунд	Эпоксидные компаунды
Плотность . . .	$г/см^3$	1	1,05	1,05	1	—	1,1	1,1—1,6
Теплостойкость	°С	75	75	150	150	200	120	140
Морозостойкость	°С	—	—50	—60	—60	—50	—80	—60
Усадка	%	15	—	7,5	10	—	—	—
Удельное объемное электросопротивление .	*ом·см*	10^{15}	10^{14} — 10^{15}	10^{10}— 10^{12}	10^{14} — 10^{15}	10^{14} — 10^{15}	10^{12} — 10^{14}	10^{11} — 10^{15}
Относительная диэлектрическая проницаемость . . .	—	3,5	3,5	5	3,8 — 4,5	3,2—5	4,5 — 6,5	4 — 5,5
Тангенс угла диэлектрических потерь .	—	0,005	0,005	0,05	0,02	0,03 — 0,08	0,02 — 0,07	0,03 — 0,07
Пробивная напряженность.	*кв/мм*	20	25	15	20—25	25—30	27—29	15—25

Пропиточные лаки служат для пропитки пористой, в частности, волокнистой твердой изоляции (бумага, картон, пряжа, ткань, изоляция обмоток трансформаторов, катушек и т. д.).

Покровные лаки служат для образования механически прочной, гладкой, блестящей, влагостойкой пленки на поверхности лакируемых предметов. Нередко этими лаками покрывают твердую пористую изоляцию, предварительно уже подвергнутую пропитке; это имеет целью дальнейшее повышение свойств твердой изоляции (в частности, увеличение поверхностного электросопротивления и напряжения поверхностного разряда; усиление защиты изоляции от действия влаги, растворяющих или химически активных веществ и от приставания пыли и грязи; улучшение внешнего вида).

К покровным лакам принадлежат также пигментированные эмали; это — лаки, в состав которых входит пигмент, т. е. мелкий порошок неорганического состава (обычно окислы металлов), придающий пленке определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и способность прочно приставать к поверхности, на которую наносится лак. Некоторые эмали наносят не на твердую изоляцию, а непосредственно на металл, при этом на его поверхности образуется электроизоляционный слой (изоляция эмальпроволоки или листов электротехнической стали в расслоенных магнитопроводах трансформаторов).

Особым видом пигментированных эмалей являются полупроводящие лаки, в которых пигментом является углерод (сажа); пленки таких лаков имеют пониженное удельное поверхностное электросопротивление (от 10^4 до 10^{11} *ом*); они используются для достижения нужного распределения электрического поля в аппаратуре.

Клеящие лаки служат для склеивания между собой твердых электроизоляционных материалов или для приклеивания электроизоляционных материалов к металлу. Наряду с высокими изоляционными свойствами, малой гигроскопичностью и другими характеристиками, необходимыми для электроизоляционных лаков вообще, к клеящим лакам предъявляют требование особенно высокой адгезии к различным материалам.

Приведенное разделение лаков по областям применения не всегда может быть выдержано вполне строго. В ряде случаев пропиточные и покровные лаки почти не различаются между собой по составу и свойствам. При изготовлении гетинакса и текстолита (см. § 16) лак, пропитывающий отдельные слои бумаги или ткани и склеивающий эти слои друг с другом, является одновременно и пропиточным и клеящим.

По режиму сушки различают:

а) лаки горячей (печной) сушки, которые при низкой температуре сохли бы весьма медленно или не образовывали пленку необходимого качества и потому требуют для сушки высокой температуры;

б) лаки холодной (воздушной) сушки, которые достаточно быстро и хорошо сохнут на воздухе при нормальной комнатной температуре.

В ряде случаев после воздушной сушки лаковой пленки требуется последующая термическая обработка при повышенной температуре для получения более высокой степени полимеризации смолы и повышения электрических характеристик твердой пленки.

По составу электроизоляционные лаки делятся на следующие группы:

а) масляные;
б) масляно-смоляные;
в) масляно-битумные;
г) смоляные;
д) эфиро-целлюлозные;
е) лаки сложного состава.

Основой масляных лаков служат высыхающие масла — вязкие жидкости растительного происхождения, для которых характерна способность под действием нагрева, освещения, соприкосновения с воздухом и других факторов переходить в твердое состояние.

Тонкий слой масла, налитый на поверхность какого-либо материала, „высыхает“ и образует твердую, блестящую, прочно пристающую к подложке пленку, обладающую сравнительно высокими электроизоляционными свойствами. Важно отметить, что высыхание масел отнюдь

не объясняется испарением части жидкости, а является сложным физико-химическим процессом, связанным с явлением окислительной полимеризации, т. е. поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха. Поэтому для полного высыхания масел (например при сушке масляных лаков) необходим доступ кислорода воздуха. При высыхании вес льняного и подобных ему масел не уменьшается, а даже несколько увеличивается.

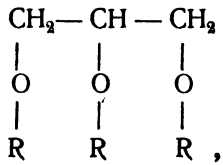
Следует иметь в виду, что рассмотренное выше нефтяное конденсаторное масло не имеет ничего общего с высыхающими маслами, так как в нем отсутствуют вообще двойные связи.

Скорость высыхания масел увеличивается с повышением температуры, при действии света, а также в присутствии катализаторов химических реакций высыхания — так называемых с и к к а т и в о в. В качестве сиккативов используют соединения некоторых металлов — свинца, кальция, марганца и кобальта. Технологически удобно вводить в масло эти металлы в виде способных растворяться в нем солей различных кислот, например резинатов. Резинаты чаще всего получают сплавлением окислов соответствующих металлов с канифолью при температуре 200—250° С.

Для иллюстрации действия сиккативов приведем следующие ориентировочные данные: добавка 0,5% свинца уменьшает время высыхания льняного масла (при той же температуре) в 2,5 раза, добавка 0,1% марганца — в 18 раз, а добавка 0,1% наиболее активного катализатора — кобальта — в 35 раз.

Отвердевшие пленки высыхающих масел довольно стойки к действию растворителей (в тяжелых углеводородах, например в нефтяном масле, они не растворяются даже при нагреве, так что являются практически вполне маслостойкими; но по отношению к ароматическим углеводородам, например к бензолу, эти пленки менее стойки). При нагреве отвердевшая пленка уже не размягчается. Таким образом, высыхающие масла являются термореактивными материалами.

По химическому составу высыхающие масла, как и другие растительные масла, представляют собой эфиры глицерина и органических непредельных „жирных“ кислот; общая схема строения молекул этих веществ следующая:



где R — остаток соответствующей жирной кислоты.

Масло является высыхающим только в том случае, если в остатках R имеется большое число двойных связей между соседними атомами углерода; тогда при разрыве двойных связей может происходить процесс полимеризации молекул масла, играющий большую роль в процессе отвердевания масляной пленки.

Наиболее распространенные высыхающие масла — льняное и тунговое.

Льняное масло — жидкость золотисто-желтого цвета, получаемая из семян льна. Его плотность 0,93—0,94 $г/см^3$, температура застывания — около —20° С.

Тунговое (древесное) масло получают из семян тунгового дерева, которое разводится на Дальнем Востоке и на Кавказе. Плотность тунгового масла 0,94 $г/см^3$, температура застывания — от 0 до —5° С. По сравнению с льняным маслом тунговое высыхает быстрее, причем, в противоположность льняному маслу, которое сохнет с поверхности, тунговое масло даже в сравнительно толстом слое высыхает равномерно. Кроме того, преимуществом тунгового масла перед льняным является бóльшая водонепроницаемость пленки.

Кроме высыхающих масел, масляный лак состоит из сиккативов и летучего растворителя, уменьшающего вязкость лака. В некоторых случаях употребляют масляные лаки без растворителей, так как их основа сама по себе является жидкостью, но такие лаки обладают повышенной вязкостью и менее удобны для применения. Растворителями масляных лаков являются углеводороды (например бензин, керосин, иногда с примесью ароматических углеводородов).

Масляно-битумные лаки содержат помимо битумов высыхающие масла. Свойства этих лаков зависят от подбора и количественного соотношения составных частей. Благодаря присутствию высыхающих масел пленки этих лаков более гибки и приобретают термореактивный характер, почему в меньшей степени подвержены размягчению при нагреве, а также значительно более стойки к действию растворителей, чем пленки чисто битумных лаков.

Лучшими растворителями для масляно-битумных лаков являются ароматические углеводороды (бензол, толуол и т. п.), а также скипидар. В связи со значительной вредностью для организма человека ароматических растворителей, особенно бензола, широко применяют смеси этих растворителей с бензином. В случае использования сравнительно легкоплавких битумов иногда допустимо применение растворителей, не содержащих ароматических углеводородов, но для лаков с более тугоплавкими и трудно растворимыми битумами введение ароматики в состав растворителя необходимо.

Масляно-смоляные лаки — это масляные лаки, в основу которых введены различные природные или искусственные смолы. Отметим масляно-глифталевые лаки; по сравнению с чисто масляными лаками они обладают повышенной нагревостойкостью, эластичностью и клеящей способностью, а по сравнению с чисто глифталевыми лаками — пониженной гигроскопичностью. Последние представляют собой растворы глифталевой смолы в жидких углеводородах, в смесях спиртов и углеводородов и т. п.; это — термореактивные лаки с высокой клеящей способностью.

К смоляным лакам относятся также бакелитовый лак — раствор бакелита (феноло-формальдегидной смолы в стадии А)

в спирте. Это — пропиточный и клеящий лак горячей сушки, дающий механически прочную, но мало эластичную и обладающую заметной склонностью к тепловому старению пленку. Широко используется в производстве гетинакса и текстолита.

Эфиро-целлюлозные лаки — растворы эфиров целлюлозы (см. § 16) в летучих растворителях — ацетоне и др.; пленки этих лаков термопластичны. Бо́льшая часть эфиро-целлюлозных лаков является лаками воздушной сушки. Наибольшее значение имеют нитроцеллюлозные лаки (нитролаки). Пленки нитролаков механически прочны, отличаются блеском, хорошо сопротивляются действию воздуха, влаги, масел и пр. Нитролаки плохо пристают к металлам, поэтому перед нанесением их на металл обычно предварительно создают слой „грунтового" лака, хорошо пристающего к металлу, но менее стойкого к действию воздуха, света и влаги (например масляного или глифталевого), а затем наносят слой нитролака. Первое покрытие требует горячей сушки, которую не выдержал бы нитролак, но эту сушку для запекания грунта производят еще до нанесениня нитролака.

Растворы полимеризационных смол на основе этилена и его производных образуют термопластичные лаки.

Полихлорвиниловые лаки обладают высокой стойкостью к действию растворителей (бензина, масла и т. п.) и химически активных веществ; они применяются в виде покровных лаков для защиты изоляции, работающей в атмосфере, содержащей кислотные пары и т. п.

Полистирольный лак обладает высокими электроизоляционными свойствами при ничтожной гигроскопичности; он используется в производстве высокочастотной аппаратуры.

Таблица 32

Электрические характеристики пленок некоторых лаков

Свойства	Единица измерения	Масляно-битумный лак	Глифталиево-масляный лак	Эскапоновый лак
Удельное объемное электросопротивление	*ом·см*	10^{15}—10^{16}	10^{14}—10^{15}	10^{14}
Удельное поверхностное электросопротивление	*ом*	10^{13}—10^{14}	10^{12}—10^{13}	—
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	3—3,6	3,6	3,9
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,03	0,04	0,005
Пробивная напряженность	*кв/мм*	55—60	60—80	140 (при толщине 60 *мкм*)

Эскапоновые лаки представляют собой растворы синтетических каучуков в органических растворителях с добавками катализатора, пластификатора и других веществ. После полимеризации эти

лаки создают плотную эластичную пленку (эскапон — см. § 15) с хорошей адгезией к металлам.

Ориентировочные электрические характеристики пленок некоторых лаков приведены в табл. 32.

Клеи. В качестве клеящих лаков применяют карбинольный клей, клеи БФ, бакелитовый, глифталевые и полистирольный лаки, акриловый, термопреновый, перхлорвиниловый клеи, нитроклеи и клеи сложного состава.

Карбинольный клей прочно склеивает самые разнообразные материалы: керамику, стекло, слюду, дерево, бумагу, картон, пластические массы, алюминий, сталь, чугун и их сочетания. Предел прочности клеевого шва для различных материалов колеблется от 80 до 300 *кГ/см*^{2}. Наибольшая прочность достигается при склеивании стали со сталью. Склеивание осуществляется при температуре 15—45° С. Отверждение производится под давлением, равным 3—5 *кГ/см*^{2}.

Карбинольный клей достаточно устойчив к действию нефтяного масла, бензина и керосина, но не совсем влаго- и теплостоек; морозостойкость его достигает —60° С. Высокая механическая прочность и достаточно высокие электроизоляционные свойства этого клея сохраняются при нагревании до +60° С.

Клеи БФ изготовляют посредством соединения поливинилацеталей и феноло-формальдегидных смол. Они обладают большой прочностью, высокой способностью сцепления с различными материалами и эластичностью слоя. Прочность клеевого шва для различных материалов колеблется от 27 до 350 *кГ/см*^{2}.

Таблица 33

Свойства клеев БФ

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	*г/см*^{3}	0,84
Содержание пленкообразующего вещества	%	10—17
Оптимальная толщина клеевого шва	*мм*	0,05—0,15
Теплостойкость	°С	180
Морозостойкость	°С	—60
Предел прочности при скалывании клеевого соединения	*кГ/см*^{2}	50—350
Удельное объемное электросопротивление	*ом·см*	10^{13}—10^{15}
Относительная диэлектрическая проницаемость		3—3,8
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,04—0,07
Пробивная напряженность	*кв/мм*	50—70

Клей БФ целесообразно применять для склейки металлов друг с другом, для электроизоляции деталей и в том случае, когда нужен клеевой шов с повышенной теплостойкостью. Клеевое соединение

на БФ-4 применяется, когда необходима эластичность и стойкость к вибрациям.

Свойства клеев БФ приведены в табл. 33.

Акриловый клей, предназначенный для склеивания полиметилметакрилата (органического стекла), изготовляют путем растворения 2 — 3 весовых частей стружки органического стекла в 97 — 98 частях дихлорэтана.

Акриловый клей образует влагонепроницаемое соединение; предел прочности при скалывании склеенных им образцов составляет 120 *кГ/см²*.

Термопреновый клей служит для приклеивания резины к мегаллу, а также для склеивания тонких и легких металлических пластин эластичной пленкой.

Основой для его получения является термопрен, представляющий собой натуральный каучук, обработанный органическими сульфокислотами. Клей приготовляется путем растворения 10 весовых частей термопрена в смеси, состоящей из 60 весовых частей очищенного авиационного бензина и 30 весовых частей бензола; предварительно термопрен, нагретый до 70—80° С, нарезают мелкими кусочками.

Термопреновый клей влагостоек, не меняет своих свойств в температурном интервале от —40 до +70° С, хорошо переносит вибрации. Преимуществом этого клея является стойкость к разрушительному действию грибков и бактерий. Из него можно получить тонкий склеивающий слой толщиной 1—2 *мкм*.

Эпоксидные клеи отличаются очень хорошей адгезией ко многим материалам, в том числе к металлам, керамике, стеклам. В зависимости от выбора отвердителя эти клеи могут затвердевать либо при комнатной температуре, либо при 100—140° С.

Сначала приготовляется пластифицированная масса (на 100 *г* смолы вводится 15—20 *г* дибутилфталата, полиэфира МГФ-9 или др.), а затем производится вакуумирование смеси с подогревом. Эта масса, если в нее не добавлять отвердитель, может храниться неограниченное время. После введения отвердителя время возможного применения клея крайне ограничено, особенно для составов холодного отверждения.

С повышением температуры прочность клеевых швов понижается, как это видно из рис. 98.

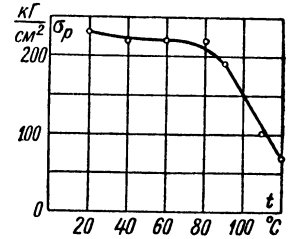


Рис. 98. Зависимость прочности эпоксидных клеевых швов от температуры.

Преимущество эпоксидных клеев состоит в том, что они не требуют больших давлений и могут затвердевать при комнатной температуре.

Полиэфироуретановый клей ПУ-2 пригоден для склеивания металлов, пластиков, дерева, силикатного и органического стекла, керамики, резины, ткани, бумаги и многих других материалов. Удельная ударная вязкость клеевых соединений в интервале тем-

пературы от —80 до +150° С колеблется в пределах 5 — 9 $кГ \cdot см/см^2$. После 2,5 лет пребывания образцов дюралюминия, склеенных при помощи клея ПУ-2, в атмосферных условиях прочность клеевых соединений при сдвиге снижается на 20—25% по сравнению с первоначальной.

В настоящее время разработаны клеи с нагревостойкостью до 300—350°С.

§ 15. Каучуковые материалы

Громадное значение в самых разнообразных областях техники и в быту имеют материалы на основе каучука и близких к нему веществ. Каучук характеризуется рядом весьма важных свойств: высокой эластичностью, превосходящей эластичность большинства материалов, малой проницаемостью для влаги и газов. Многие материалы рассматриваемой группы являются хорошими диэлектриками.

Натуральный каучук — вещество, получаемое из растений-каучуконосов. Бо́льшая часть каучуконосов содержит каучук в своем млечном соке (латексе), представляющем собой взвесь в воде микроскопических частиц округленной формы (глобул); глобулы состоят из каучука и имеют тонкую оболочку из белковых веществ и жирных кислот. Каучук выделяется при коагуляции латекса и удалении примесей.

По химическому составу натуральный каучук представляет собой углеводород, имеющий состав $(C_5H_8)_n$ и строение, характеризуемое наличием двойных связей:

$$\cdots—CH_2—\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}=CH—CH_2—CH_2—\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}=CH—CH_2—\cdots$$

Уже при нагреве до температуры всего лишь порядка 50° С каучук размягчается и становится липким, а при низких температурах он хрупок. Каучук растворяется в углеводородах и сероуглероде.

Высокая растяжимость каучука связана с зигзагообразной, „шарнирной" формой цепочек его молекул; при действии на каучук растягивающего усилия форма цепочек приближается к прямолинейной. Каучук — аморфное вещество, но в растянутом состоянии он дает рентгенограммы, характерные для кристаллических тел, имеющих упорядоченное расположение молекул в пространстве. По снятии растягивающего усилия каучук вновь приобретает свойства аморфного тела.

Вследствие малой стойкости к действию как повышенных, так и пониженных температур, а также растворителей чистый каучук для изготовления электрической изоляции и других технических целей не применяют. Для устранения этих недостатков каучук подвергают так называемой вулканизации, т. е. нагреву после введения в него серы. При вулканизации происходит частичный разрыв двойных свя-

зей цепочечных молекул и пространственное „сшивание" цепочек через атомы —*S*—; таким образом, соединение каучука с серой делает материал термореактивным.

Вулканизация улучшает как теплостойкость, так и морозостойкость каучука, повышает его механическую прочность и стойкость к растворителям. В зависимости от количества серы, добавляемой к каучуку, получают различные продукты: при введении 1—3% серы — мягкую резину, обладающую еще весьма высокой растяжимостью и упругостью, а при введении 30—35% серы — твердую резину (эбонит), твердый материал, отличающийся высокой стойкостью к ударным нагрузкам.

Величина относительного удлинения при разрыве для различных видов технических резин составляет от 150 до 500%, а для эбонита — от 2 до 6% (значения остаточного удлинения соответственно равны 10—45% и 0,8—1,2%).

Помимо каучука и серы, при изготовлении резины и эбонита в состав резиновой смеси вводят различные наполнители (мел, тальк и пр., существенно влияющие на свойства резины), а также красители, катализаторы процесса вулканизации и другие вещества.

Резину применяют в радиопромышленности для изоляции в цепях низкой частоты и питания, а также для гибких переносных проводов и кабелей.

К недостаткам резины как электроизоляционного материала следует отнести: низкую теплостойкость (при нагреве резина стареет, причем становится хрупкой и трескается); малую стойкость к действию нефтяных масел, в которых резина набухает, и других неполярных растворителей (бензол, бензин и пр.); малую стойкость к действию света, особенно ультрафиолетового, под влиянием которого резина быстро стареет. Губительно действует на резину озон, образующийся при развитии процесса ионизации в воздушных включениях или в окружающем воздухе.

Содержащиеся в резине остатки свободной, не связанной химически с каучуком серы могут оказывать вредное действие на медь, соприкасающуюся с резиной, особенно при повышенной температуре. При этом медь интенсивно соединяется с серой, образуя сернистую медь. Поэтому недопустимо непосредственно накладывать обычную резиновую изоляцию на медную жилу кабельного изделия; предварительно медь покрывают так называемым разделителем — слоем олова или другого, не подверженного влиянию серы, металла либо бумагой.

В последнее время широко применяют тиурамовую резину, при изготовлении которой берут не чистую серу, а тиурам — органическое сернистое соединение, которое при нагреве передает часть содержащейся в нем серы каучуку, что и обеспечивает вулканизацию. Тиурамовая резина не содержит свободной серы, и потому ее можно накладывать непосредственно на медь. Кроме того, тиурамовая резина обладает более высокой теплостойкостью; так, в кабельных изде-

лиях для обычных (сернистых) резин допускается рабочая температура +55 °С, а для тиурамовых резин +65 °С (если тиурамовая резина защищена свинцовой или полихлорвиниловой оболочкой — даже до +80 °С).

Широко распространены резины, содержащие в качестве наполнителя сажу и имеющие поэтому черный цвет; они обладают хорошими механическими свойствами, но электроизоляционные свойства их низки. Поэтому сажевые резины в радиоэлектронике используют лишь в тех случаях, когда от них не требуются высокие электроизоляционные свойства, например в наружных защитных оболочках (шлангах) резиновых кабелей.

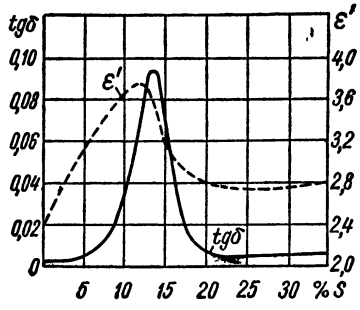


Рис. 99. Зависимость ε' и tg δ вулканизированного каучука от содержания серы.

Чистый каучук практически неполярен; он имеет ρ порядка 10^{16} *ом·см*; $\varepsilon' = 2{,}4$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}002$. Примерный характер изменения ε' и tg δ при вулканизации каучука различными количествами серы показан на рис. 99, рост ε' и tg δ вызван усилением полярных свойств материала за счет атомов серы; но при очень большом содержании серы (материал типа эбонита) ориентация дипольных молекул затрудняется увеличенной вязкостью вещества.

Свойства резины сильно зависят от состава резиновой смеси и от технологии; для обычных электроизоляционных резин $\rho \approx 10^{15}$ *ом·см*; $\varepsilon' = 3 \div 7$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}02 \div 0{,}10$ (для сажевых резин — до 0,25); $E_{пр} = 20 \div 30$ *кв/мм*.

Эбонит, применяемый в электротехнике, выпускается в виде листов (досок), палок, трубок. Он хорошо поддается механической обработке и используется для изготовления различных изделий (преимущественно в технике слабых токов), аккумуляторных баков и т. п. В последние годы эбонит в значительной мере вытесняется пластмассами, не содержащими каучука.

В течение многих лет натуральный каучук добывали исключительно в тропических странах, сначала из дикорастущих каучуконосных деревьев (Бразилия), а затем в основном из тех же деревьев, специально разводимых на каучуковых плантациях (Индонезия, Цейлон и др.).

До Великой Октябрьской социалистической революции каучук в Россию полностью ввозился из-за границы. Партия и Правительство поставили задачу ликвидировать зависимость советской индустрии от импорта этого продукта посредством получения отечественного каучука. Эта задача была успешно разрешена в результате разработки способов промышленного получения синтетического каучука и частично за счет нахождения отечественных растений-каучуконосов, произрастающих в умеренном климате (например кок-сагыз). Способы

синтеза веществ, близких по свойствам к натуральному каучуку, были найдены в результате работ С. В. Лебедева, Н. Д. Зелинского, Б. В. Бызова и др.

Сырьем для получения СК (сокращенное обозначение синтетического каучука в отличие от сокращения НК — для натурального каучука) могут служить спирт или же нефть, т. е. продукты, получаемые в Советском Союзе в больших количествах.

Наиболее распространенный синтетический каучук — **бутадиеновый** (СК-Б) — получается при полимеризации газообразного углеводорода бутадиена. Молекула бутадиена (дивинила), которую мы можем представить состоящей из двух винильных групп:

$$H_2C{=}CH{-}CH{=}CH_2,$$

при полимеризации в присутствии катализатора (металлического натрия) дает СК-Б, цепочки молекул которого имеют вид:

$$\cdots{-}CH_2{-}CH{=}CH{-}CH_2{-}\cdots$$

Таким образом, по составу СК-Б довольно близок к НК, который мы можем представить себе как полимер углеводорода изопрена (метилдивинила):

$$H_2C{=}\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}}{-}CH{=}CH_2.$$

СК-Б широко применяют взамен НК для изготовления как мягкой резины, так и эбонита. СК-Б, используемый для целей электрической изоляции, должен быть тщательно отмыт от остатков катализатора (натрия), которые могут ухудшить его электрические свойства.

При нагреве до температуры 200—300° С в присутствии катализатора бутадиеновый каучук (без добавки вулканизирующих веществ) дополнительно полимеризуется за счет частичного разрыва двойных связей и переходит в **эскапон**, по механическим свойствам приближающийся к эбониту, но более нагревостойкий и мало подверженный действию кислот и органических растворителей. По мере увеличения времени полимеризации материал получается все более твердым.

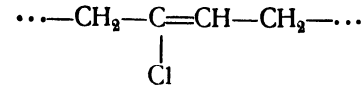
Эскапон имеет весьма высокие электроизоляционные свойства: $\rho = 10^{17}$ *ом·см*; $\rho_s = 10^{16}$ *ом*; $\varepsilon' = 2{,}7 \div 3$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}0005$.

Помимо СК-Б, существует еще целый ряд синтетических каучуков, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки и соответственно свою область применения.

Так, например, **хлоропреновый каучук**, получаемый полимеризацией хлоропрена:

$$HC{=}\underset{\displaystyle Cl}{\underset{|}{C}}{-}CH{=}CH_2,$$

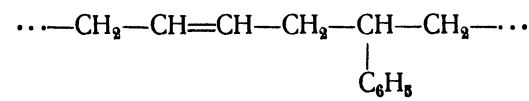
имеет строение:



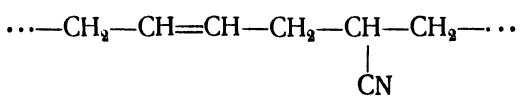
Это — дипольный материал (за счет присутствия атомов хлора), обладающий невысокими электроизоляционными свойствами; зато он сравнительно стоек к действию масла и бензина, а также озона и других окислителей, почему с успехом может применяться для защитных оболочек кабельных изделий и т. п. Он менее склонен к тепловому старению, чем НК, и менее проницаем для газов.

Бутадиен-стирольный каучук (буна-S или СКС) получается при совместной полимеризации бутадиена и стирола, а бутадиен-нитрилакрильный каучук (буна-N или СКН) — при совместной полимеризации бутадиена и акрилнитрила $H_2C{=}CH{-}CN$. По электроизоляционным свойствам СКС приближается к НК; электроизоляционные свойства СКН благодаря его дипольной природе невысоки.

Строение молекул СКС и СКН соответственно имеет вид:

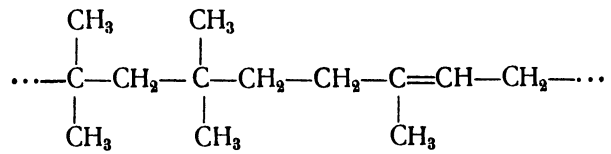


и



Каучук СКН мало набухает в масле и теплостоек до температуры около 230° С.

Бутилкаучук получают совместной полимеризацией изобутилена: $CH_2{=}C{\cdot}(CH_3)_2$ с небольшим количеством изопрена или бутадиена. Строение бутилкаучука соответствует формуле:



В молекуле бутилкаучука число двойных связей значительно меньше, чем в НК или упомянутых выше типах СК; этим обусловлена высокая стойкость бутилкаучука к действию кислорода и озона, а также серной и азотной кислот. Бутилкаучук обладает газопроницаемостью в 10—20 раз меньшей, чем НК; эластичность его относительно невысока, но сохраняется и при температурах ниже минус 60°С, что характеризует высокую морозостойкость бутилкаучука.

К новейшим видам каучуковых материалов можно отнести сополимер фторуглеродов, отличающийся высокой теплостойкостью и химической стойкостью, и полиуретановые каучуки, характеризующиеся особенно высокой механической прочностью и малым старением.

§ 16. Целлюлозные материалы и слоистые пластики

В большинстве случаев для изготовления волокнистых органических материалов применяют в качестве исходного сырья растительные волокна. При изготовлении пряжи и тканей известное применение имеет также волокно животного происхождения — натуральный шелк. В последнее время для изготовления пряжи, используемой

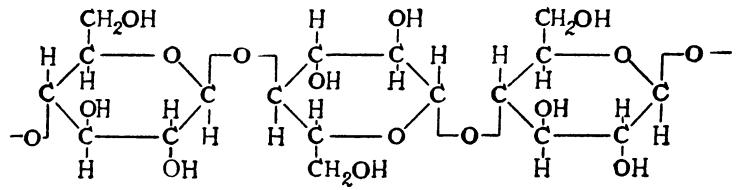


Рис. 100. Структурная формула целлюлозы.

в качестве электрической изоляции, применяют также волокна из искусственных продуктов (ацетатный шелк, капрон).

Все органические волокнистые материалы отличаются значительной пористостью и большой гигроскопичностью, особенно при их изготовлении из растительных волокон.

Наличие воздуха в порах таких материалов приводит к пониженным значениям их пробивной напряженности. Благодаря высокой гигроскопичности, в условиях повышенной влажности органические волокнистые материалы быстро отсыревают и резко снижают свои электрические свойства.

Для того чтобы обеспечить повышение электрической прочности и улучшить влагоустойчивость органической волокнистой изоляции, необходимо проводить ее сушку и пропитку.

Поскольку основным видом сырья для изготовления волокнистых органических электроизоляционных материалов служат растительные волокна (специально обработанная древесина, хлопок, лен), необходимо рассмотреть вопрос о химической природе и строении этих волокон.

Основой всякого растительного волокна является органическое вещество — целлюлоза. Это вещество представляет собой полимерный углевод $(C_6H_{10}O_5)_n$, молекулы которого имеют вид длинных цепей (число звеньев в цепях $n = 1000 \div 2000$).

Структурная формула, изображающая несколько звеньев молекулярной цепи целлюлозы, дана на рис. 100. В каждом звене молекулы

содержатся по три гидроксильных группы — ОН. Наличие этих групп обусловливает полярность целлюлозы, так как при воздействии электрического поля гидроксильные группы способны смещаться по отношению ко всей молекулярной цепи, создавая эффект структурной (дипольно-радикальной) поляризации. В связи с этим целлюлоза имеет относительно высокую диэлектрическую проницаемость ($\varepsilon' = 6{,}5 \div 7$) и большой тангенс угла потерь ($\operatorname{tg}\delta = 0{,}005 \div 0{,}010$); при промышленной частоте максимум угла потерь целлюлозы лежит около —80° С, а при высокой частоте смещается в область положительных температур.

Пучки молекулярных цепей целлюлозы, имеющие длину порядка 150 ÷ 200 ангстремов (Å) и диаметр 20 ÷ 50 Å, носят название мицелл.

Скопление мицелл, имеющих вид тонких трубочек с наружным диаметром порядка 1000 ÷ 5000 Å, образует элементарные волокна — фибриллы.

Растительное волокно, состоящее из фибрилл, вытянутых вдоль его оси, имеет вид пустотелой трубочки. В зависимости от типа волокон длина его может составлять от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров; диаметр волокна находится в пределах от 0,02 до 0,07 *мм*; толщина стенок составляет 0,002—0,008 *мм*.

Между мицеллами, между фибриллами и в самих молекулах целлюлозы имеются поры различных размеров, указанных в табл. 22.

В материале, построенном из растительных волокон, появляется еще добавочная макроскопическая пористость, обусловленная зазорами между волокнами.

Объем пор в непропитанных волокнистых материалах доходит до 40 ÷ 50%. Это обстоятельство в сочетании с полярностью клетчатки создает высокую гигроскопичность волокнистых органических диэлектриков. Поэтому волокнистые материалы подвергаются пропитке после изготовления из них изделия или выпускаются уже в пропитанном состоянии. Роль пропитки волокнистых материалов была рассмотрена в § 8. Хотя пропитка и не может полностью защитить целлюлозные материалы от действия влажности, но она полезна еще и потому, что увеличивает их теплопроводность, снижает возможность ионизации воздуха в порах и повышает их механическую прочность.

Бумаги. В настоящее время основным сырьем для изготовления электроизоляционных сортов бумаги служит древесина хвойных пород. Древесное волокно, кроме целлюлозы, содержит ряд нецеллюлозных органических примесей в количестве до 30 — 40%. Наиболее нежелательной примесью с точки зрения электроизоляционной техники является лигнин, наличие которого приводит к резкому снижению теплостойкости древесного волокна.

Поэтому для приготовления бумажной массы в производстве электроизоляционных бумаг используют древесное волокно, подвергнутое специальной обработке в щелочной среде для снижения содержания лигнина, — „древесную целлюлозу“ (сульфатную целлюлозу).

Сульфатная древесная целлюлоза, содержащая до 5—10% примесей, поступает на бумажную фабрику в виде спрессованных листов, напоминающих по внешнему виду толстый рыхлый картон. Сначала производят предварительное раздробление этих листов, а затем и более тонкий водный размол.

Готовая бумажная масса представляет собой очень жидкую кашицу в виде взвеси растительных волокон в воде. Содержание волокна в бумажной массе составляет около 1%.

Бумажная масса проходит через специальную центрифугу для удаления песчинок и других тяжелых инородных частичек и поступает на бумажную машину. На этой машине она обезвоживается и уплотняется валиками. В конце машины помещены горячие цилиндры, обогреваемые паром. Огибая эти цилиндры, бумага окончательно высушивается (остаточное содержание воды 5 ÷ 6%) и далее наматывается в рулон.

При выработке бумаги волокна стремятся преимущественно вытянуться по направлению движения жидкой массы, т. е. вдоль хода машины. Вследствие этого прочность бумаги на разрыв вдоль хода машины (вдоль преобладающего направления волокон) всегда выше, чем в перпендикулярном направлении. У кабельных бумаг, например, прочность вдоль рулона в два раза выше, чем поперек.

Наиболее важным для радиотехники сортом бумаги является конденсаторная бумага.

Конденсаторная бумага. Диэлектрик бумажного конденсатора используется при высоких значениях напряженности электрического поля и при температуре, достигающей 70 ÷ 100° С. В связи с этим к качеству конденсаторной бумаги предъявляют особо высокие требования. Этот сорт электроизоляционной бумаги отличается от других весьма малой толщиной (от 0,007 до 0,022 *мм*) и высокой плотностью. По ГОСТ 1908-49, различаются два сорта бумаги: КОН-I плотностью до 1,17 $г/см^3$ и КОН-II плотностью 1,25 $г/см^3$ (бумага особо повышенной плотности). В настоящее время имеется бумага толщиной 0,004 *мм*. Малая толщина конденсаторной бумаги позволяет обеспечить высокое значение удельной емкости конденсатора (рассчитанной на единицу объема), поскольку при низком рабочем напряжении удельная емкость в первом приближении обратно пропорциональна квадрату толщины бумаги.

Бумага особо повышенной плотности (КОН-II) применяется для радиоконденсаторов, используемых при постоянном напряжении, так как в этих условиях она дает повышенные значения не только для кратковременной, но и для длительной электрической прочности, а также выигрыш в емкости; бумага КОН-I дает меньшие значения $\operatorname{tg}\delta$ и более высокую длительную прочность при переменном напряжении (хотя кратковременное значение $E_{пр}$ для нее несколько ниже).

Предел прочности при растяжении непропитанной конденсаторной бумаги (вдоль рулона) весьма велик и достигает 1000 $кГ/см^2$. Высокая механическая прочность обеспечивает малое количество обрывов

при тех условиях, которым подвергаются тонкие ленты бумаги на конденсаторных намоточных станках.

При температуре 110—120° С бумага заметно окисляется и снижает механическую прочность, а при 150—160° С быстро разрушается вследствие разложения и обугливания клетчатки. При установлении верхнего предела рабочей температуры для бумажного конденсатора обычно приходится ориентироваться в большей степени на теплостойкость пропиточной массы, чем на теплостойкость бумаги (исключение представляет новая пропиточная масса на основе кремнийорганических соединений).

Пробивная напряженность сухой непропитанной конденсаторной бумаги составляет 35—40 *кв/мм*; после пропитки маслом $E_{пр}$ возрастает до 250—300 *кв/мм*. Такое упрочение объясняется тем, что пробивная напряженность масла в тонких зазорах значительно выше, чем пробивная напряженность воздуха ($E_{пр.м} > E_{пр.в}$).

Учитывая резко выраженное старение пропитанной бумаги при длительном воздействии электрического поля, приходится брать большой запас электрической прочности по отношению к указанным здесь значениям (до 10 раз).

Рабочую напряженность поля в бумажных конденсаторах с жидкой пропиткой обычно принимают: при постоянном напряжении равной 25—35 *кв/мм* и при переменном напряжении (50 *гц*) равной 12—15 *кв/мм*.

Для обеспечения достаточно надежной эксплуатации конденсатора при столь высоких значениях напряженности поля необходимо достигать максимальной однородности структуры конденсаторной бумаги и отсутствия в ней даже малых количеств посторонних примесей. Воздухопроницаемость доброкачественной конденсаторной бумаги составляет менее 1—2 *мл/мин*, зольность менее 0,5%, а реакция водной вытяжки должна быть близка к нейтральной (допускается слабая щелочность).

Изготовление бумаги такого качества представляет значительные трудности, чем и объясняется высокая стоимость конденсаторной бумаги; чем тоньше бумага, тем она дороже. Конденсаторная бумага нормальной плотности, тщательно просушенная и пропитанная нефтяным маслом, имеет $\varepsilon' = 3{,}7$; $\operatorname{tg}\delta = 0{,}002 \div 0{,}003$ (при частоте 50 *гц*).

Для изоляции телефонных кабелей применяется специальный сорт кабельной бумаги, называемый телефонной (ГОСТ 3553-47), имеющей толщину 0,05 *мм*. Эту бумагу изготовляют как натурального цвета (светло-коричневый), так и окрашенную в красный, синий или зеленый цвета для обеспечения различной расцветки жил телефонного кабеля.

Пропиточная бумага (ГОСТ 3441-46) для производства слоистой бумажно-бакелитовой изоляции изготовляется из сульфатной целлюлозы и отличается пониженной плотностью и в связи с этим обладает большой впитываемостью. Толщина бумаги 0,12 *мм*, плот-

ность 0,5—0,6 *г/см*^{3}; пробивная напряженность бумаги должна быть не ниже 5 *кв/мм*.

Электротехнический картон. Тонкий листовой материал, изготовленный подобно бумаге из растительных волокон, но отличающийся от нее повышенной толщиной, а потому требующий некоторых изменений в технологии производства, носит название картона.

При малых толщинах (0,1—0,8 *мм*) картон изготовляют в рулонах, как и бумагу, а при большой толщине (до 1÷3 *мм*) — в листах.

ГОСТ 2824-56 предусматривает изготовление трех марок электроизоляционного картона ЭВ (для работы на воздухе).

Предел прочности при растяжении рулонного картона при толщине 0,1÷0,5 *мм* должен быть не менее 900 *кГ/см*^{2} в продольном направлении и не менее 325 *кГ/см*^{2} в поперечном, для листов соответственно: 850 *кГ/см*^{2} и 350 *кГ/см*^{2}.

Пробивная напряженность для картона ЭВ в воздушно-сухом состоянии (при толщине 0,1—0,5 *мм*) должна быть не менее 11 *кв/мм*, а при толщинах 2,5÷3 *мм* — не менее 7,5 *кв/мм*.

Эфиры целлюлозы. При соответствующей химической обработке целлюлозы образуются соединения — эфиры целлюлозы, простые и сложные, в которых атомы водорода в упомянутых гидроксильных группах полностью или частично замещены различными радикалами. Так, при обработке целлюлозы азотной кислотой получается сложный эфир целлюлозы — нитроцеллюлоза, в которую вместо атомов водорода в гидроксильных группах входит нитрогруппа — NO_2; в ацетилцеллюлозе атомы водорода гидроксильных групп замещены радикалом уксусной кислоты — $CO - CH_3$, а в этилцеллюлозе — группой этила — C_2H_5 и т. п. Эфиры целлюлозы термопластичны; они растворимы в соответствующих органических растворителях.

Так как в молекулах эфиров целлюлозы число гидроксильных групп меньше, чем в молекулах целлюлозы, то эфиры целлюлозы значительно менее гигроскопичны, чем целлюлоза.

Нитроцеллюлоза весьма горюча и взрывоопасна, что является ее существенным недостатком.

Ацетилцеллюлоза имеет удовлетворительные электроизоляционные свойства; в отличие от нитроцеллюлозы она практически негорюча. Недостатком ее является заметная гигроскопичность.

Простые эфиры целлюлозы — этилцеллюлоза и близкая к ней по строению бензилцеллюлоза обладают повышенными электроизоляционными свойствами; при сравнительно высокой температуре размягчения они характеризуются также и хорошей морозостойкостью (чистая этилцеллюлоза еще сохраняет гибкость при температуре —50° С).

Ранее при изготовлении эфиров целлюлозы удавалось замещать радикалами в среднем только до 2—2,5 гидроксильных групп на каждое звено молекул целлюлозы. В последнее время получены эфиры целлюлозы, в которых практически замещены все три гидроксила в каждом звене.

Уксуснокислый эфир целлюлозы этого типа получил название триацетата целлюлозы. Наряду с ним изготовляется похожий по свойствам ацетобутират целлюлозы, представляющий собой эфир целлюлозы с уксусной и масляной кислотами. Трехзамещенный эфир целлюлозы с пропионовой кислотой известен под названием трипропионата целлюлозы.

Эфиры целлюлозы широко применяют для изготовления искусственных волокон, пленок, лаков и пластических масс.

Пленки из эфиров и других химических производных целлюлозы принадлежат к числу наиболее распространенных в технике и в быту гибких пленок; сюда относятся кино- и фотопленки (обычно из нитроцеллюлозы), упаковочные материалы (например целлофан — пластифицированная глицерином пленка из материала, по составу аналогичная вискозному искусственному шелку, и т. п.), пленки из триацетата целлюлозы.

Триацетатные электроизоляционные пленки изготовляются без пластификатора и с различным содержанием пластификатора толщиной 0,025; 0,04 и 0,07 *мм*.

Основные характеристики триацетатных пленок приведены в табл. 34.

Таблица 34

Основные свойства триацетатных пленок

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Гигроскопичность	%	6
Предел прочности при растяжении	*кГ/см²*	650—900
Относительное удлинение	%	12—20
Удельное объемное электросопротивление	*ом · см*	10^{14}
Пробивное напряжение, не менее	*кв*	3,5
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	3,6
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,007

При довольно высоком пределе прочности на растяжение триацетатные пленки (как и многие другие гибкие пленки) весьма чувствительны к надрыву — раз образовавшаяся на краю пленки трещина легко распространяется дальше. Для устранения этого недостатка пленку иногда наклеивают на картон; получается материал с высокой электрической (за счет пленки) и механической (за счет картона) прочностью, называемый пленкокартоном.

Текстильные электроизоляционные материалы. Текстильная промышленность изготовляет для целей электрической изоляции пряжу (т. е. нити, скрученные из отдельных волокон) и ткани, а также ленты (тонкие, гибкие материалы, полученные переплетением нитей в определенном порядке). Пряжу применяют для изоляции проводов

и шнуров путем обмотки и оплетки; ткани обычно используют в лакированном виде.

Для изготовления пряжи идут различные типы органических волокон: растительного (хлопчатобумажная пряжа, т. е. волокно хлопка), животного (натуральный шелк) и синтетического происхождения (различные сорта искусственного шелка).

Натуральный шелк получают размоткой коконов червя-шелкопряда, живущего на листьях тутового дерева. Каждый кокон состоит из одной нити с эффективным диаметром 0,01 ÷ 0,015 *мм* и длиной до 2000 *м*. Пряжа из натурального шелка позволяет обеспечить меньшие значения толщины изоляции по сравнению с хлопчатобумажной изоляцией и лучшую устойчивость электрических свойств при воздействии влажности. Кроме того, шелковая изоляция более механически прочна и имеет более красивый внешний вид, чем хлопчатобумажная. Недостатком натурального шелка, затрудняющим его широкое применение, является большая стоимость по сравнению с хлопчатобумажной изоляцией.

Основными типами искусственного шелка до последнего времени являлись вискозный и ацетатный, получаемые переработкой эфиров целлюлозы. В отличие от исходной клетчатки (целлюлозы) ее эфиры обладают хорошей растворимостью и позволяют изготовлять из них тонкие нити при вытекании растворов этих веществ через отверстия малого диаметра. Вискозный шелк получают из ксантогенового эфира (изготовляемого обработкой клетчатки продуктом взаимодействия сероуглерода и едкой щелочи), а ацетатный шелк — из уксуснокислого эфира клетчатки (ацетилцеллюлозы).

По внешнему виду оба эти шелка напоминают натуральный, но изготовленная из них пряжа имеет ту же толщину, что и хлопчатобумажная. По электрическим свойствам вискозный шелк не имеет преимуществ по сравнению с хлопчатобумажной изоляцией, однако ацетатный шелк превосходит не только хлопчатобумажную пряжу, но и пряжу из натурального шелка. Пониженное качество вискозного шелка объясняется тем, что исходный продукт, служащий для его изготовления, химически мало отличается от клетчатки.

Для того чтобы установить тип шелка, использованный для изоляции проводника, следует взять прядку нитей и поджечь их спичкой; натуральный шелк издает при этом запах горелого рога, ацетатный — характерный запах уксусной кислоты, а вискозный — запах горелой бумаги.

В последнее время начал применяться новый тип синтетического волокна — капрон, изготовляемый из полиамидной смолы.

Для определения средней толщины волокон принято давать их „метрический номер“ N_m, т. е. число метров волокна в одном грамме. Очевидно, чем больше N_m, тем тоньше волокно. Для нитей, скрученных из нескольких отдельных элементарных волокон, номер обозначается в виде дроби, числителем которой является номер элементарного волокна, а знаменателем — число скрученных друг с другом

волокон (пример: капроновая нить 600/4 скручена из четырех элементарных капроновых волокон, причем 600 *м* элементарного волокна весят 1 *г*).

В электроизоляционной технике используют в большей степени механические свойства тканей и лент, чем их электрические свойства, которые считают недостаточными. Это объясняется тем, что электрическая прочность непропитанных текстильных материалов определяется пробивной напряженностью воздуха в сквозных отверстиях между нитями, а потому весьма мала. Путем пропитки лаком можно закрыть сквозные отверстия лаковой пленкой и этим резко повысить электрическую прочность ткани, одновременно улучшив и ее влагостойкость.

Лакоткани. Электроизоляционные лакоткани изготовляют путем пропитки хлопчатобумажной ткани или ткани из натурального шелка масляным или масляно-битумным лаком (см. § 14). В зависимости от исходной ткани при пропитке масляным лаком получают светлые (желтые) лакоткани: ЛХ (хлопчатобумажную) и ЛШ (шелковую). На светлые лакоткани имеется ГОСТ 2214-46.

При выработке лакоткани исходную ткань „опаливают" и каландрируют (пропускают через вальцы) для удаления ворсинок, могущих привести к местным утолщениям при лакировке.

Подготовленная таким способом ткань идет в лакировочную машину, на которой подвергается трехкратной пропитке; после каждого прохода через ванну с лаком ткань пропускают через сушильную печь длиной 12—15 *м* при температуре 115—135° С. Скорость движения ткани в лакировочной машине составляет 0,25—0,5 *м/мин* в зависимости от толщины и марки лакоткани. Толщина хлопчатобумажных лакотканей составляет 0,15—0,25 *мм*; основные характеристики даны в табл. 35.

Таблица 35

Свойства светлой хлопчатобумажной лакоткани

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	$г/см^3$	1,1
Предел прочности при растяжении	$кГ/см^2$	
вдоль основы		300
поперек основы		200
Водопоглощаемость за 24 часа	%	8
Удельное объемное электросопротивление	$ом \cdot см$	10^{12}
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	4
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,05—0,15
Пробивная напряженность	*кв/мм*	35

Шелковая лакоткань отличается от хлопчатобумажной пониженной толщиной (0,04—0,16 *мм*) и более высокой пробивной напряжен-

ностью (увеличение в 1,5—2 раза); кроме того, шелковые лакоткани менее чувствительны к перегибам.

При длительном действии повышенной температуры лакоткани стареют и приобретают хрупкость в соответствии с процессом старения лаковой пленки.

Лакоткани применяют в радиоэлектронике в качестве тонкого гибкого электроизоляционного материала для изоляции трансформаторов, катушек индуктивности, обмоток и тому подобных целей.

Сочетание из волокнистой основы и лаковой пленки можно использовать для изготовления изоляционных трубок путем пропитки хлопчатобумажной оплетки („чулка") масляным лаком. Такие трубки, под названием линоксиновых, применяют для добавочной изоляции проводников при монтаже аппаратуры.

Трубки изготовляют длиной 1 *м* и диаметром 1,5—10 *мм*; толщина стенок 0,5—0,8 *мм*. Пробивное напряжение линоксиновых трубок не менее 2—2,5 *кв*.

В последнее время при монтаже слаботочной аппаратуры такие трубки часто заменяют цветными трубками из полихлорвинила (см. § 13).

Для аппаратуры, эксплуатирующейся при повышенных температурах, употребляют стеклолакоткани с кремнийорганической пропиткой (см. § 17).

Слоистые пластики. Широкое применение в качестве конструкционных и электроизоляционных материалов низкочастотных цепей имеют слоистые пластики, в которых основой является тот или иной листовой волокнистый материал. К ним относятся гетинакс, текстолит и др.

Гетинакс получается горячей прессовкой бумаги, пропитанной феноло-формальдегидной смолой в стадии А. Для производства гетинакса берется пропиточная бумага. Пропитка ее смолой может производиться различными способами: лаковым, путем нанесения расплавленной смолы или пропитки водной смоляной суспензией. Последний способ наиболее экономичен и позволяет получить материал вполне удовлетворительного качества.

Пропиточная бумага нарезается листами требующегося формата, собираегся пачками нужной толщины и укладывается между стальными плитами гидравлического пресса. Прессы для производства слоистых пластиков с целью повышения производительности выполняются с располагаемыми в несколько „этажей" обогревательными плитами, и заготовки из пропиганной бумаги закладывают одновременно во все этажи. Во время прессования тепло от плит передается прессуемому материалу; феноло-формальдегидная смола расплавляется, заполняет поры между волокнами бумаги и отдельными листами ее и, запекаясь (переходя в стадию С), твердеет и прочно связывает отдельные слои бумаги.

При прессовании гетинакса обычно дают давление на материал 100—120 $кГ/см^2$; температура плит пресса 160 — 165° С; время выдержки под давлением между горячими плитами пресса — от 2 до 5 *мин* на каждый миллиметр толщины досок, считая

с момента достижения плитами пресса указанной выше температуры. У отпрессованного материала края обрезают под прямым углом циркульной пилой.

Свойства гетинакса, предназначенного для использования в радиоаппаратуре, согласно ГОСТ 2718-54, приведены в табл. 36.

Дугостойкость гетинакса, как и других феноло-формальдегидных пластмасс, невысока. После действия разряда на поверхности материала остается науглероженный „след", обладающий значительной электропроводностью.

Слоистое строение гетинакса приводит к заметному различию в электрических свойствах при их измерении в направлениях, перпендикулярном и параллельном слоям. Так, например, удельное объемное электросопротивление гетинакса вдоль слоев в 50—100 раз ниже, чем поперек слоев; пробивная напряженность вдоль слоев в 5—8 раз ниже, чем поперек слоев.

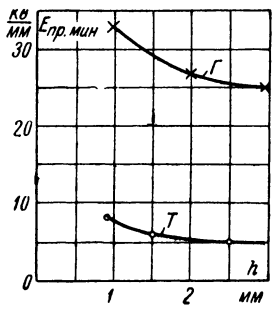


Рис. 101. Зависимость минимальной пробивной напряженности радиотехнических марок гетинакса (*Г*) и текстолита (*Т*) от толщины листов при частоте 50 *гц*.

Перед испытанием образцы выдерживались при температуре 70° С в течение 4 *час*, после чего находились при температуре 20 ± 5° С в течение 6 *час* при относительной влажности 65 ± 3%. Текстолит испытывался на пробой в масле при температуре 90 ± 2° С.

Гетинакс может обрабатываться механически, причем режущий инструмент желательно иметь из твердых сплавов; станки должны быть снабжены тягой для удаления пыли; скорости резания даются большие при небольших подачах; охлаждение можно вести только воздушной струей. При штамповке тонкого гетинакса часто применяют предварительный подогрев для уменьшения растрескивания краев детали. Торцы штампованных деталей рекомендуется защищать электроизоляционным лаком. Не следует сфрезеровывать поверхностный слой материала, так как такая обработка ведет к ухудшению влагостойкости гетинакса.

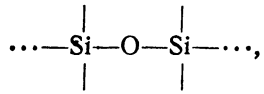
Текстолит аналогичен гетинаксу, но изготовляется не из пропитанной бумаги, а из пропитанной ткани.

Свойства различных марок листового электротехнического текстолита определяются ГОСТ 2910-54. Свойства текстолита на хлопчатобумажной ткани в общем близки к свойствам гетинакса; текстолит имеет повышенные удельную ударную вязкость, стойкость к истиранию и сопротивление раскалыванию при вдавливании клина в торец доски. Текстолит в 5 — 6 раз дороже гетинакса, так как стоимость ткани значительно выше стоимости бумаги, и должен применяться лишь в отдельных случаях: для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или истиранию (детали переключателей и т. п.). Свойства текстолита даны в табл. 36.

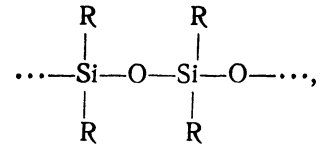
Особым видом текстолита является стеклотекстолит (см. **§ 17**).

соединений и материалов на их основе, развитое в нашей стране трудами К. А. Андрианова и других исследователей.

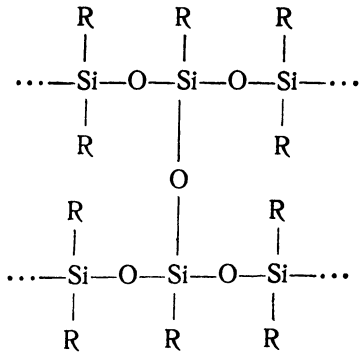
Кремнийорганические соединения — полиорганосилоксаны имеют резко отличное от органических полимеров строение цепей молекул, схематически показанное на рис. 102. В основе строения этих соединений лежит „кремнийкислородный скелет", характерным элементом строения которого является весьма устойчивая силоксанная группировка атомов:



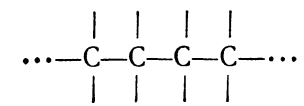
причем свободные валентности атомов кремния насыщаются органическими радикалами (например, группой метила — CH_3, этила — C_2H_5, фенила — C_6H_5 и т. п.). Кремнийорганические полимеры могут быть как термопластичными и иметь линейное строение:



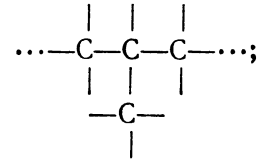
так и термореактивными, и образовывать пространственные структуры, например:



(в написанных выше формулах под R подразумеваются органические радикалы). Таким образом, эти соединения существенно отличаются от рассмотренных выше органических полимеров, в которых основу строения молекул образуют атомы углерода, соединенные друг с другом в виде линейных цепей:



или же разветвленных цепей, например:



связь между двумя соседними атомами углерода значительно менее устойчива, чем силоксанная связь (энергия связи Si — O равна 89 *ккал/моль*), что и определяет собой меньшую теплостойкость органических полимеров по сравнению с кремнийорганическими. Исключение составляют только фторопласты, (см. § 13).

Полиорганосилоксаны резко отличаются от органических полимеров по структуре цепей молекул и занимают промежуточное положение между кварцем и органическими полимерами. Химический состав и структура полиорганосилоксанов определяют ряд ценных в техническом отношении свойств.

Полиорганосилоксаны обладают высокой устойчивостью к действию влаги и температуры, они химически инертны, стойки к окислению, способны противостоять продолжительному действию солнечного света, действию кислорода и озона. Эти свойства характерны для всех известных в настоящее время полиорганосилоксанов.

Изучение химии полиорганосилоксанов показало, что структура молекул оказывает большое влияние на свойства полимеров. Малая полярность и слабое взаимодействие между цепями молекул приводит к большой морозостойкости полиорганосилоксанов, но к низким механическим свойствам.

Известно, что изменение вязкости с температурой у жидких органосилоксанов в пятьдесят раз меньше, чем у нефтяных масел, и сжимаются они на 14%, в то время как органические жидкости — на 6 — 7%. Модуль упругости у полидиметилсилоксанового пластика в интервале температур от 0 до — 80° С изменяется в 1,8 раза, а у натурального каучука в интервале температур от 25 до 64° С в 100 раз. Это обусловлено не только составом кремнийорганических полимеров, но и спиралеобразной структурой цепей их молекул.

Спиралеобразная структура молекул определяет их высокий коэффициент сжатия и малое изменение вязкости от температуры.

Свойства полиорганосилоксанов можно изменять, заменяя органические радикалы у атомов кремния на различные группы.

Рассматривая структуру полиорганосилоксанов и их электрические свойства, легко видеть, что связь Si — O, входящая в состав полимерной цепи молекул полиорганосилоксанов, определяет релаксационный характер диэлектрических потерь (рис. 103), причем максимум диэлектрических потерь лежит в области — 100° С.

Полиорганосилоксаны обладают большой стойкостью к термическому окислению. Это объясняется, в частности, тем, что органические радикалы у атома кремния более стойки к окислению, чем ради-

калы у атомов углерода. Связь Si — O в молекулах полиорганосилоксанов имеет ярко выраженный полярный характер, поэтому она экранирует связь Si — C и соответственно снижает силовой эффект молекулы кислорода, воздействующий на полимер. Кроме того, линейные полиорганосилоксаны легче подвергаются термической деструкции, чем „сшитые" или пространственные; так в линейных молекулах при действии высоких температур разрываются не только связи Si —O,

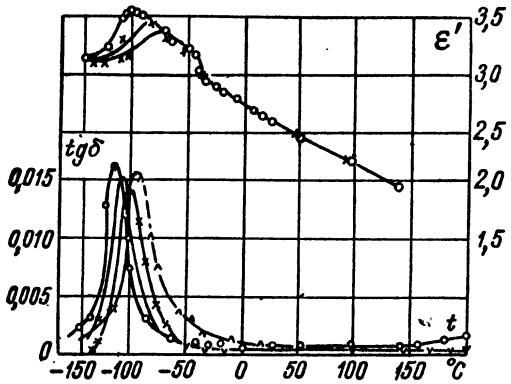


Рис. 103. Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь для полидиэтилсилоксана от температуры.

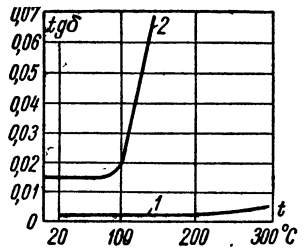


Рис. 104. Зависимость tg δ от температуры полифенилдиметилсилоксановой смолы (*1*) и органической полиэфирной смолы (*2*).

но и связи Si — C. Но и в этом случае тепловая устойчивость полимеров сильно зависит от радикалов и групп, входящих в состав полимерной молекулы.

Кремнийорганические полимеры обладают более высокой термоэластичностью, чем органические. Так, при 180° C „время жизни" кремнийорганических пленок исчисляется десятками и сотнями часов; некоторые из них (например К-48) при 180° C сохраняют эластичность до 2000 *час*, а при 220° C — до 150 *час*, в то время как ни один из испытанных органических полимеров (кроме фторуглеродов) не выдерживает и одного часа.

Электрические свойства полиорганосилоксанов значительно лучше сохраняются при высоких температурах, чем у органических полимеров, как это наглядно видно из рис. 104.

Частотные характеристики ε′ и tg δ одной из кремнийорганических смол показаны на рис. 105.

Кремнийорганические материалы могут быть получены в виде жидкостей, смол и эластичных каучукообразных продуктов. Кремнийорганические смолы используются для изготовления компаундов, лаков, пластмасс. Высокая теплостойкость кремнийорганических соединений указывает на целесообразность их использования в каче-

стве связующего в сочетании с высокотеплостойкими неорганическими материалами (слюда, стеклянное волокно, асбест и пр.) в виде миканитов, стеклолакотканей. Кроме того, кремнийорганические соеди-

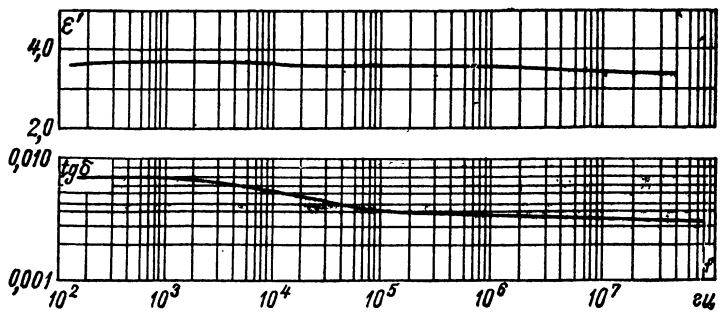


Рис. 105. Зависимость ε' и tg δ у полидиметилфенилсилоксановой смолы на стеклянной ткани от частоты электрического поля.

нения обладают весьма малой гигроскопичностью и многие из них практически не смачиваются водой.

Таблица 37

Характеристики кремнийорганических жидкостей

Свойства	Единица измерения	№ 2	№ 4	„Калория-2"	Примечание
Плотность . . .	*г/см*³	0,93 — 0,95	0,97 — 1,18	0,99 — 1,02	Жидкость „калория-2" характеризуется крайне малой зависимостью электрических характеристик от температуры в интервале от — 60 до + 100°С и выше и применяется главным образом для пропитки конденсаторов
Вязкость при 20° С	*сст*	6 — 12	32 — 55	—	
Кислотность . .	pH	6 — 7	6 — 7	6 — 7	
Температура вспышки . . .	°С	110	150	—	
Температура застывания, не выше	°С	— 60	— 60	— 60	
Содержание воды	%	0,01	0,01	0,01	
Удельное объемное электросопротивление	*ом·см*	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$	$> 10^{14}$	
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	2,4	2,4	2,4 — 2,5	
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 *гц* . .	—	0,0005	0,0005	0,0005	

Даже простая выдержка некоторых диэлектриков (целлюлозные материалы, керамика и др.) в атмосфере, содержащей пары низкомолекулярных кремнийорганических соединений, способна значительно понизить гигроскопичность этих материалов.

В настоящее время в Советском Союзе изготовляется значительное количество разнообразных кремнийорганических продуктов и материалов. Свойства кремнийорганических жидкостей приведены в табл. 37. По внешнему виду кремнийорганические жидкости прозрачны, как вода, химически инертны, не токсичны.

До последнего времени применению кремнийорганических смол для изготовления пластмасс препятствовал ряд присущих им особенностей: малая скорость отверждения под давлением, высокие температуры прессования, продолжительная дополнительная термообработка, невысокая механическая прочность. В настоящее время разработано пять пресспорошков на основе кремнийорганики, которые можно применять для запрессовки конденсаторов, сопротивлений, панелей, печатных схем, деталей переключателей и выключателей, если необходима повышенная теплостойкость. Ориентировочные характеристики материала в изделиях из этих порошков приведены в табл. 38.

Таблица 38

Свойства кремнийорганических пластмасс

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	*г/см*^{3}	1,8 — 2
Температурный коэффициент линейного расширения	*град*$^{-1}$	$(10 — 14) \cdot 10^{-6}$
Теплостойкость по Мартенсу	°С	200 — 360
Водопоглощаемость за 24 *часа*	%	0,2 — 0,5
Предел прочности при изгибе	*кГ/см*^{2}	300 — 625
Удельная ударная вязкость	*кГ·см/см*^{2}	3 — 20
Удельное объемное электросопротивление	*ом · см*	$10^{13} — 10^{14}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	5 — 10
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,01 — 0,4
Пробивная напряженность	*кв/мм*	3 — 15
Температура прессования	°С	140 — 210
Время выдержки на 1 *мм* толщины	*мин*	1 — 8
Давление при прессовании	*кГ/см*^{2}	300 — 450
Термическая обработка при 160—200° С	*час*	5 — 24

На основе кремнийорганических смол изготовляются теплостойкие компаунды, лаки и клеи.

Стирольно-кремнийорганический пропиточный компаунд (60% смолы и 40% стирола) характеризуется показателями, приведенными в табл. 39.

В настоящее время наша промышленность выпускает более 10 лаков и пигментированных эмалей на кремнийорганических

Таблица 39

Свойства стирольно-кремнийорганического компаунда

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Максимальная рабочая температура	°С	180
Минимальная рабочая температура	°С	— 60
Удельное объемное электросопротивление	*ом · см*	$\sim 10^{12}$
Тангенс угла диэлектрических потерь . . .	—	0,007
Температура полимеризации	°С	95 — 110
Время полимеризации	*час*	2
Термическая обработка при 150° С	„	15 — 17
Усадка	%	3

полимерах, применяющихся для тех или иных радиотехнических целей (изоляция проводников, намоточные изделия, изготовление стеклотекстолита и т. п.).

Для ориентировки в табл. 40 приведены характеристики некоторых из этих лаков.

Таблица 40

Характеристики некоторых кремнийорганических лаков и эмалей

Свойства	Единица измерения	Лак К-44	Лак К-50	Лак К-55	Лак ФГ-9	Эмаль ПКЭ-15
Содержание пленкообразующего	%	60	60	50	34	~ 60
Водопоглощение за 24 *часа*	%	—	0,3	0,7	0,8	—
Время использования лаковой пленки при 200° С не менее	*час*	250	20	320	3	250
Удельное объемное электросопротивление	*ом · см*	10^{15}	$3 \cdot 10^{15}$	$3{,}5 \cdot 10^{11}$	$4{,}5 \cdot 10^{15}$	10^{15}
Удельное поверхностное электросопротивление при 65% влажности	*ом*	—	$7 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$	10^{14}	—
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	3,1	3,2	3,1	3,4 — 3,6	3,7
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,003 — 0,01	0,006	0,003	0,009	0,01
Пробивная напряженность	*кв/мм*	80 — 110	60	60	50	37

К клеям, содержащим кремнийорганические соединения, относится однокомпонентный клей ВС-10М, применяющийся для склеивания металлов и пластмасс. Клеевые соединения устойчивы к действию воды, масла и выдерживают старение при 150° С в течение 100 *час*. Прочность клеевых соединений характеризуется данными табл. 41.

Таблица 41

Прочность соединений дюралюминия клеем ВС — 10М

При равномерном отрыве, *кГ/см²*		При неравномерном отрыве *кГ/см²*		Предельное время длительной прочности при напряжении сдвига 85 *кГ/см²* и температуре 60° С, *час*
при 20°С	при 60°С	при 20°С	при 60°С	
550	350	18—25	18—25	200

Кремнийорганический каучук (СКТ) и резина на его основе являются теплостойкими, влагостойкими диэлектриками. Молекулярный вес каучука 400 000—700 000, он стоек к действию озона и ультрафиолетовых лучей. Растворяется в ароматических углеводородах и маслах, не стоек к кислотам и щелочам.

Кремнийорганические резины, употребляющиеся для изготовления прокладок, колпачков, шайб, трубок, шнуров и других изделий, используемых при деформации порядка 10% в среде воздуха и озона, незначительно изменяют свои характеристики в диапазоне температур от —60 до +200° С, в том числе и в условиях тропической влажности. Обобщенные характеристики кремнийорганических резин различных марок приведены в табл. 42.

Таблица 42

Свойства кремнийорганических резин

Предел прочности при растяжении, *кГ/см²*	Относительное удлинение, %	Морозостойкость, °С не выше	Удельное объемное электросопротивление, *ом·см*	Пробивная напряженность *кв/мм*	Режим вулканизации		
					время, *мин*	температура, °С	давление, *кГ/см²*
22—25	170—200	—60	10^{14}	11—20	10	150	35

На основе стеклянной ткани и кремнийорганических смол изготовляют теплостойкие стеклотекстолиты светло-кремового или белого цвета толщиной от 0,1 *мм* и выше. Свойства одного из видов такого текстолита приведены в табл. 43.

Таблица 43

Свойства стеклотекстолита на кремнийорганической связке

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	$г/см^3$	1,75
Теплостойкость по Мартенсу	°С	300
Водопоглощение за 24 часа	%	0,45
Предел прочности:		
при растяжении	$кГ/см^2$	2500
при изгибе	»	1400
Удельная ударная вязкость	$кГ \cdot см/см^2$	60
Удельное объемное электросопротивление	$ом \cdot см$	$5 \cdot 10^{18}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	4,6
Тангенс угла диэлектрических потерь при 10^6 *гц*	—	0,003—0,006
Пробивная напряженность	*кв/мм*	7,5

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Неорганические диэлектрики имеют исключительно важное значение для современной радиоэлектроники, что обусловлено целым рядом их положительных свойств. К таким свойствам можно отнести высокую нагревостойкость, отсутствие у большинства материалов гигроскопичности, хорошие электрические характеристики при достаточной механической прочности, стабильности и надежности изделия, стойкость к действию излучений высокой энергии, развитию плесени и поражению насекомыми. Сырье для производства основных радиотехнических материалов и изделий доступно и дешево.

По своей природе неорганические диэлектрики, за малым исключением, представляют собой ионные соединения. Среди них различают монокристаллы и поликристаллические тела, которые подвергаются перед использованием только механической обработке, и поликристаллические и аморфные материалы, получаемые в результате высокотемпературной обработки минерального сырья. К дополнительным преимуществам последних относится возможность достижения заранее заданных характеристик материала путем изменения состава массы и технологии производства изделий. Именно неорганические диэлектрики обладают такими свойствами, при помощи которых можно наиболее просто решать ряд задач новой техники. Это относится к сегнетоэлектрикам, пьезоэлектрикам и керамическим электретам.

Для удобства изучения неорганические диэлектрики можно подразделить на следующие группы:

Классификация и свойства керамических

Тип материала	Класс	Группа	Диэлектрическая проницаемость при температуре $+20 \pm 5$°C	Температурный коэффициент емкости образца, $град^{-1}$	Тангенс угла потерь, при темпе	
					$+20 \pm 5$°C	$+80 \pm 5$°C
1. Высокочастотные материалы с диэлектрической проницаемостью выше 12	I	а	$130 \div 190$	$-(1300 \pm 200)10^{-6}$	0,0006	0,0008
		б	$65 \div 100$	$-(700 \pm 100)\ 10^{-6}$	0,0006	0,0008
	II	а	$31 \div 50$	$-(80 \pm 30)10^{-6}$	0,0006	0,0008
		б	$17 \div 30$	$-(50 \pm 20)\ 10^{-6}$	0,0006	0,0008
	III	—	$12 \div 30$	$+(30 \pm 20)\ 10^{-6}$	0,0006	0,0008
2. Высокочастотные материалы с диэлектрической проницаемостью ниже 9	IV	а	Не более 7,5	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	0,0010	0,0012
		б	Не более 8		0,0020	0,0030
		в	Не более 7,5	$+(60 \pm 20)\ 10^{-6}$	0,0006	0,0008
	V	—	Не более 9	$+(110 \pm 30) \cdot 10^{-6}$	0,0012	0,0018
	VI	—	Не более 7,5	Не нормируется		
	VII	—		$+(200 \pm 100)\ 10^{-6}$	0,0050	0,0070
3. Низкочастотные материалы с диэлектрической проницаемостью выше 1000	VIII	а	Не менее 2800	Не нормируется	0,04	0,05
		б	Не более 2000	Не нормируется	0,04	0,05
		в	Не менее 1000	*	0,005	0,005

* Изменение диэлектрической проницаемости в интервале от -60 до $+100$°C ратуре $+20 \pm 5$°C.

Для материалов класса VIII группы „б", в случае, когда они предназначаются личина которого должна быть не менее $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ CGSE.

** Измерение должно производиться при температуре $+300 \pm 10$°C.

материалов согласно ГОСТ 5458-57 *Таблица 44*

диэлектрических не более		Удельное объемное электросопротивление при $t = 100 \pm 5°C$, *ом·см*, не менее	Электрическая прочность, *кв/мм*, не менее	Предел прочности при статическом изгибе, *кГ/см²*, не менее	Температурный коэффициент линейного расширения, *град*$^{-1}$, не более	Рекомендуемая область применения
ратуре						
$+100 \pm 5°C$	после увлажнения					
0,0010	0,0008	10^{11}	6	800	$12 \cdot 10^{-6}$	Для контурных и разделительных конденсаторов, не определяющих стабильность частоты
0,0012	0,0008	10^{11}	8	800	$8 \cdot 10^{-6}$	Для контурных, термокомпенсирующих и разделительных конденсаторов
0,0010	0,0008	10^{11}	8	700	$8 \cdot 10^{-6}$	Для конденсаторов высокой стабильности
0,0012	0,0008	10^{11}	8	700	$8 \cdot 10^{-6}$	
0,0012	0,0008	10^{11}	8	700	$8 \cdot 10^{-6}$	
Не нормируется	0,0012	10^{12}	20	1400	$8 \cdot 10^{-6}$	Для мелких установочных деталей
	0,0022	10^{12}	20	1400	$8 \cdot 10^{-6}$	Для крупных установочных деталей
	0,0008	10^{12}	20	800	$3 \cdot 10^{-6}$	Для катушек индуктивности высокой стабильности, в. ч. конденсаторов
	0,0015	10^{12}	20	2000	$6 \cdot 10^{-6}$	Для мелких и среднегабаритных деталей с высокой механической прочностью и термостойкостью
0,0012**	Не нормируется	10^{12}**	Не нормируется	600	$6 \cdot 10^{-6}$	Для изоляторов, применяемых внутри вакуумных приборов
Не нормируется	0,0060	10^{11}	18	600	$6 \cdot 10^{-6}$	Для установочных деталей, не определяющих стабильность аппаратуры
Не нормируется	0,07	10^{10}	2	500	$12 \cdot 10^{-6}$	Для конденсаторов низкой частоты и постоянного тока
	0,10	10^{10}	3	500	$12 \cdot 10^{-6}$	Для пьезоэлектрических преобразователей и конденсаторов низкой частоты
	0.007	10^{11}	6	500	$12 \cdot 10^{-6}$	Для конденсаторов низкой частоты и постоянного тока

—не более $\pm 35\%$ по отношению к диэлектрической проницаемости при темпе-

для изготовления преобразователей, производится измерение пьезомодуля d_{31}, ве-

спекания, степень пластичности керамической массы при формовании — определяются в основном количеством стекловидной фазы. Наличие газовой фазы (газы в закрытых порах) связано со способом обработки массы и приводит к снижению механической и электрической прочности керамических изделий, а также вызывает диэлектрические потери при повышенных напряженностях поля вследствие ионизации газовых включений.

ГОСТ 5458-57 „Материалы керамические радиотехнические" (табл. 44) подразделяет радиокерамику на три типа, восемь классов и ряд групп.

Рецептуру материалов, так же как и исходное сырье, ГОСТ 5458-57 не регламентирует. Поэтому различные заводы выбирают рецептуру керамики, исходя из местных условий — сырьевой базы, имеющегося оборудования, инструмента, кадров.

Рассмотрим, на основе каких систем окислов могут быть получены материалы различных классов (ГОСТ 5458-57).

Материалы системы $BaO — Al_2O_3 — SiO_2$

В радиотехнике получили широкое применение несколько видов материалов, минералогический состав которых относится к указанной системе:

1) муллитовая керамика — радиофарфор, пирофиллит;

2) корундовая и корундо-муллитовая керамика — алюминоксид, ультрафарфор, КМ-1;

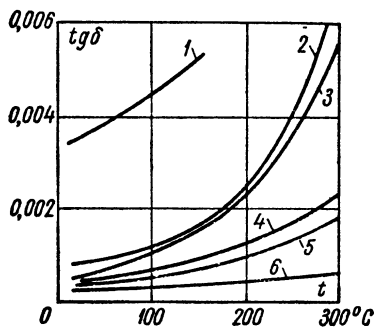


Рис. 108. Температурная зависимость tg δ основных видов установочной радиокерамики при $f = 10^6$ *гц*.

1 — радиофарфор; *2* — ультрафарфор УФ-46; *3* — стеатит С-55; *4* — шпинелевая керамика Ш-15; *5* — ультрафарфор УФ-53; *6* — цельзиановая керамика ЦМ-3.

3) цельзиановая керамика — ЦМ-3.

Указанные группы материалов различаются по содержанию глинистого вещества и окиси бария. В алюминоксиде глинистое вещество почти отсутствует; в связи с этим в него не вводится и углекислый барий.

Электрические свойства алюминоксида главным образом определяются модификацией окиси алюминия.

В цельзиановой керамике глинистое вещество хотя и содержится в массе в большом количестве, однако в процессе обжига алюмосиликат вступает во взаимодействие с окисью бария и образует химическое соединение — цельзиан.

С другой стороны, аморфная фаза, неизбежно образующаяся в цельзиановой керамике при обжиге, является высокобариевым стеклом.

Благодаря этому цельзиановая керамика отличается преимущественно электронной проводимостью и очень малыми диэлектрическими потерями.

Корундовая, корундо-муллитовая и муллитовая керамика содержат незначительное количество окиси бария (до 7%), которая входит в стекловидную фазу. Наиболее высокими электрическими свойствами характеризуется корундовая керамика (ультрафарфор), содержащая 35% стекла, затем следует корундо-муллитовая керамика; наибольшими диэлектрическими потерями обладает муллитовая керамика с содержанием стекла около 65% (радиофарфор и пирофиллит).

Поскольку все рассмотренные материалы, за исключением алюминоксида, содержат в массе значительное количество каолинитов, они характеризуются высокой пластичностью до обжига и допускают изготовление крупногабаритных изделий.

В табл. 45 приведено содержание важнейших окислов в керамических материалах рассматриваемой системы, а в табл. 46 и на рис. 108 — их основные свойства.

Таблица 45

Содержание важнейших окислов в материалах системы $BaO — Al_2O_3 — SiO_2$

Наименование окисла	Содержание окислов, %					
	цельзиановая керамика	радиофарфор	корундо-муллитовая керамика (КМ-1)	ультрафарфор		алюминоксид
				УФ-46	УФ-53	
BaO	36,4	8,5	6,7	3,3	3,1	—
Al_2O_3	26,9	30,5	62,8	80,2	84,1	99,0
SiO_2	36,7	61,0	30,5	16,5	12,8	1,0

Муллитовая керамика

Радиофарфор и пирофиллит явились первыми видами высокочастотной установочной керамики в СССР. При выборе их состава исходили из возможности улучшения электрических свойств обычного изоляторного фарфора, состоящего из каолина, кварца и полевого шпата, путем введения в его состав окиси бария, резко снижающей диэлектрические потери и электропроводность стекловидной фазы.

В связи с высоким содержанием глины (до 40%) радиофарфор и пирофиллит отличаются высокой пластичностью массы, что позволяет изготовлять из них как мелкие, так и крупногабаритные изделия.

По своим свойствам радиофарфор и пирофиллит занимают промежуточное положение между обычным изоляторным фарфором и новыми видами плотной установочной керамики.

Таблица 46

Основные свойства керамических материалов системы $BaO — Al_2O_3 — SiO_2$

Вид керамики	Корундо-муллитовая	Цельзиановая	Глиноземистая		Муллитовая
Класс по ГОСТ	IV, группа „б"	IV, группа „в"	V		VII
Обозначение материала	КМ-1	ЦМ-3	Ультрафарфор УФ-46	Ультрафарфор УФ-53	Радиофарфор
Основная кристаллическая фаза	Al_2O_3 — корунд $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ — муллит	$BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ цельзиан	Al_2O_3 корунд	Al_2O_3 корунд	$3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, SiO_2
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 0,5—5 *Мгц*	6,8—7,4	6,5—7,5	8,0—8,2	8,0—8,5	6—6,5
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости в интервале температур 20—80° С при частоте 0,5—5 *Мгц*, *град*$^{-1}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	$+(60 \pm 20)\ 10^{-6}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	$+(150 \pm 30)\ 10^{-6}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 *Мгц* и температуре 25 ± 5°С	$(14—18)\ 10^{-4}$	$(2—4)\ 10^{-4}$	$(8—10)\ 10^{-4}$	$(3—5)\ 10^{-4}$	$(30—40)\ 10^{-4}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 *Мгц* и температуре 80 ± 5°С	$(20—24)\ 10^{-4}$	$(4—6)\ 10^{-4}$	$(12—15)\ 10^{-4}$	$(4—8)\ 10^{-4}$	$(50—60)\ 10^{-4}$
Пробивная напряженность, *кв/мм*	30—35	25—35	20—25	25—30	20—25

Продолжение таблицы 46

Вид керамики	Корундо-муллитовая	Цельзиановая	Глиноземистая		Муллитовая
Класс по ГОСТ	IV, группа „б"	IV, группа „в"	V		VII
Обозначение материала	КМ-1	ЦМ-3	Ультрафарфор УФ-46	Ультрафарфор УФ-53	Радиофарфор
Удельное объемное электросопротивление при температуре 100 ± 5°С, *ом·см*	10^{13}—10^{14}	10^{12}—10^{13} (при 300°С)	10^{12}—10^{14}	10^{12}—10^{14}	10^{12}
Предел прочности при статическом изгибе, *кГ/см²*	1600—2000	800—1000	2000—2500	2500—3000	700—900
Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур + (20 — 100)° С, *град*$^{-1}$	(3,2—3,8) 10^{-6}	(2,2—2,6) 10^{-6}	(5,0—5,5) 10^{-6}	(5,0—5,5) 10^{-6}	(4—4,5) 10^{-6}
Плотность, *г/см³*, не более	3,0	3,0—3,1	3,2—3,4	3,2—3,4	2,5—2,6
Коэффициент усадки по диаметру на сухую заготовку: для прессованных	1,14—1,16	1,16—1,18	1,18—1,20	1,14—1,15	1,12—1,14
Коэффициент усадки по диаметру на сухую заготовку: для тянутых	1,24—1,28	1,22—1,24	1,23—1,25	1,22—1,28	1,2—1,22
Температура обжига, °С	1350 ± 20	1370 ± 20	1360 ± 20	1360 ± 20	1300 ± 20
Основные методы оформления	Протяжка (для крупногабаритных деталей), литье	Протяжка, литье	Протяжка, прессование	Протяжка	Протяжка, литье

Корундовая и корундо-муллитовая керамика

Кристаллическая фаза этих материалов содержит в том или ином количестве корунд. Последний характеризуется исключительно высоким значением модуля упругости (до $3{,}8 \cdot 10^6$ *кГ/см*^{2}) и пределом прочности при сжатии (σ_c до 30 000 *кГ/см*^{2}). Окись алюминия, или глинозем существует в трех модификациях — низкотемпературной γ, высокотемпературной α и в виде химического соединения с одно- и двухвалентными элементами, так называемой β-модификации.

Высокими электрическими свойствами обладает только α-глинозем (см. табл. 18). Глинозем, используемый в производстве радиокерамики, содержит все три модификации, в связи с чем необходима предварительная его обработка. Эта обработка сводится к обжигу его при температурах 1380 — 1420° С, когда γ-модификация переходит в α-модификацию с объемным сжатием до 14%. Вследствие этого операция предварительного обжига глинозема значительно снижает усадочные коэффициенты изделий. Применение при обжиге глинозема специальных добавок, например борной кислоты, заметно повышает содержание α-глинозема.

При обжиге глинозема и изделий из него существенное значение имеет газовая среда. Обжиг в восстановительной среде способствует распаду β-глинозема и образованию α-модификации. В соответствии с этим при восстановительной газовой среде заметно улучшаются свойства глиноземистой керамики.

Алюминоксид. Этот материал, иногда называемый корундизом синтеркорундом и т. п., явился первым видом высокоглиноземистой керамики в СССР.

С точки зрения указанных выше требований к технологии материала алюминоксид имеет неблагоприятные характеристики — он обладает большой абразивностью, непластичен, отличается высокой температурой спекания (до 1750° С). Однако, благодаря высоким электрическим, механическим и тепловым свойствам, алюминоксид все еще находит применение. Из него изготовляются для ответственных назначений внутриламповые изоляторы с пористой структурой, изоляторы плотной структуры для электронных ламп и др.

Для уменьшения усадочных коэффициентов и стабилизации технологических параметров, в качестве сырьевого материала при изготовлении изделий из алюминоксида часто применяется не технический глинозем, а так называемый алунд, представляющий собой плавленую окись алюминия.

Ультрафарфор и КМ-1. Такая керамика содержит в своем составе от 35 до 80% глинозема, от 10 до 50% глинистых веществ и добавки — углекислый барий, боросодержащий минерал ашарит, углекислый стронций. Эти материалы в зависимости от содержания в них глинозема получили наименования: ультрафарфор (УФ-46, УФ-53, УФ-50) — при высоком содержании глинозема, КМ-1 — при ограниченном содержании глинозема.

Тангенс угла потерь и механическая прочность ультрафарфора лучше, чем корундо-муллитовой керамики КМ-1. Особенно высокими свойствами обладает разновидность ультрафарфора, в которой содержание глинозема велико (УФ-50). Однако, в связи с малой пластичностью этого материала, из него выпускаются только малогабаритные изделия. Температура обжига ультрафарфора УФ-50 составляет около 1480°С, тогда как другие разновидности глиноземистой керамики спекаются при более низких температурах (см. табл. 46).

Механическая прочность глиноземистой керамики сильно зависит от технологических режимов помола массы и газовой среды при обжиге. Чем выше дисперсность частиц и чем более восстановительной является газовая среда, тем при более низких температурах обжига обеспечивается максимальная механическая прочность.

Хорошая пластичность корундо-муллитовой керамики КМ-1 и ультрафарфора УФ-46, а также невысокая температура их спекания позволяют изготовлять из них не только мелкие радиодетали, но и крупногабаритные изоляторы.

Цельзиановая керамика

В состав цельзиановой керамики входят предварительно синтезированное соединение, называемое цельзианом ($BaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), а также углекислый барий, каолин, глина, которые при обжиге изделий образуют дополнительно кристаллическую фазу цельзиана и высокобариевое алюмосиликатное стекло.

Характерными особенностями цельзиановой керамики являются очень низкий температурный коэффициент линейного расширения, незначительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости и весьма небольшие диэлектрические потери, вплоть до температур 300 — 400° С.

В связи с указанным, цельзиановая керамика рекомендуется для изготовления катушек индуктивности высокой стабильности, изоляторов и высокочастотных конденсаторов большой реактивной мощности или же предназначаемых для высоких рабочих температур. Выше отмечалось, что характер электропроводности цельзиановой керамики — электронный; ионная составляющая электропроводности становится значительной лишь при температурах свыше 600°С.

Технологические характеристики цельзиановой керамики достаточно благоприятны, масса пластична, температура ее спекания невысока. Существенным недостатком цельзиановой керамики является сравнительно небольшая механическая прочность.

Материалы системы $MgO — Al_2O_3 — SiO_2$

Окислы системы $MgO — Al_2O_3 — SiO_2$ образуют девять кристаллических фаз; периклаз MgO, форстерит $2MgO \cdot SiO_2$, клиноэнстатит $MgO \cdot SiO_2$, кристобалит и тридимит SiO_2, кордиерит $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$, муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, корунд Al_2O_3 и шпинель $MgO \cdot Al_2O_3$.

Рассмотрим следующие керамические материалы:

1) клиноэнстатитовую керамику — стеатит;
2) форстеритовую керамику;
3) кордиеритовую керамику;
4) периклазовую керамику;
5) шпинелевую керамику марки Ш-15.

Исходным сырьем для изготовления первых трех материалов служит природный тальк ($3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$); периклазовую и шпинелевую керамику получают на основе магнезита ($MgCO_3$) и глинозема.

По электрическим свойствам и значению температурного коэффициента линейного расширения особое место занимает кордиеритовая керамика. Неплотная упаковка кордиерита предопределяет повышенные диэлектрические потери и электропроводность. Особенностями структуры кристаллов кордиерита объясняется и весьма незначительный температурный коэффициент линейного расширения. Кордиеритовая керамика используется для изготовления термостойких изделий, применяемых вне поля высокой частоты.

Остальные виды керамики системы $MgO — Al_2O_3 — SiO_2$ характеризуются высокими электрическими свойствами при условии ограниченного содержания глинистых веществ.

Большим достоинством тальковой керамики является ее малая абразивность. Вследствие этого тальковая керамика широко используется для изготовления мелких прессованных и штампованных радиодеталей — как с плотной структурой, так и пористых для внутриламповых изоляторов.

Интервал спекания тальковой керамики сравнительно узок. Начиная с некоторой температуры, наблюдается резкое возрастание количества жидкой фазы в черепке, сопровождаемое снижением ее вязкости. В результате, изделия из тальковой керамики легко деформируются при обжиге.

Неблагоприятными „огневыми" свойствами отличается не только клиноэнстатитовая керамика, но также шпинелевая, форстеритовая и периклазовая. Узкий интервал спекания шпинелевой керамики в значительной мере обусловлен наличием в ее составе минерализатора — борного ангидрида, который частично входит в стекловидную фазу

Таблица 47

Содержание важнейших окислов в материалах системы $MgO — Al_2O_3 — SiO_2$

Наименование окисла	Содержание окислов, %				
	периклазовая керамика	форстеритовая керамика	стеатитовая керамика	шпинелевая керамика	кордиеритовая керамика
MgO	95	57	35	23	14
Al_2O_3	2	—	—	66	35
SiO_2	3	43	65	11	52

Таблица 48

Основные свойства керамических материалов системы $MgO—Al_2O_3—SiO_2$

Вид керамики	Стеатитовая			Шпинелевая
Класс по ГОСТ	IV, группа „а"	IV, группа „а"	IV, группа „а"	IV, группа „а"
Обозначение материала	Б-17	С-55	С-4	Ш-15
Основная кристаллическая фаза	$MgO \cdot SiO_2$ клиноэнстатит	$MgO \cdot SiO_2$ клиноэнстатит	$MgO \cdot SiO_2$ клиноэнстатит	$MgO \cdot Al_2O_3$ шпинель
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 0,5 — 5 *Мгц*	6,0—6,5	6,0—7,0	6,0—7,0	7,0—7,5
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости в интервале температур 20 — 80° С при частоте 0,5 ÷ 5 *Мгц*, *град*$^{-1}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$	$+(110 \pm 30)\ 10^{-6}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 *Мгц* и температуре: 20 ± 5° С	$(6 \div 8)\ 10^{-4}$	$(3 \div 6)\ 10^{-4}$	$(7 \div 8)\ 10^{-4}$	$(5 \div 8)\ 10^{-4}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 *Мгц* и температуре: 80 ± 5° С	$(8 \div 9)\ 10^{-4}$	$(6 \div 7)\ 10^{-4}$	$(8 \div 10)\ 10^{-4}$	$(6 \div 9)\ 10^{-4}$
Пробивная напряженность, *кв/мм*	>20	>20	>20	>20

Продолжение таблицы 48

Вид керамики	Стеатитовая			Шпинелевая
Класс по ГОСТ	IV, группа „а"	IV, группа „а„	IV, группа „а"	IV, группа „а"
Обозначение материала	Б-17	С-55	С-4	Ш-15
Удельное объемное электросопротивление при температуре 100 ± 5°С, *ом · см*	10^{12}	10^{13}	$10^{12} \div 10^{13}$	$10^{13} \div 10^{14}$
Предел прочности при статическом изгибе, *кГ/см²*	1400—1500	1600—2000	1400—1500	1400 —1800
Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур + (20 ÷ 100)° С, *град⁻¹*	(7,0 ÷ 7,5) 10^{-6}	(6,5 ÷ 7,0) 10^{-6}	(6,0 ÷ 7,0) 10^{-6}	(5,5 ÷ 6,0) 10^{-6}
Плотность, *г/см³*	2,95	3,0	2,8	3,0
Коэффициент усадки по диаметру на сухую заготовку — для прессованных	1,12—1,13	1,17—1,18	1,25—1,27	1,09—1,10
Коэффициент усадки по диаметру на сухую заготовку — для тянутых	—	1,24—1,26	—	1,20—1,22
Температура обжига, ° С	1350 ± 20	1320 ± 20	1320 ± 10	1360 ± 20
Основные методы оформления	Прессование, горячее литье	Прессование, протяжка, горячее литье	Прессование, штамповка	Протяжка

и в свою очередь способствует снижению ее вязкости. В случае периклазовой керамики особое значение приобретают процессы рекристаллизации окиси магния при обжиге, развитие которых приводит к образованию вторичной открытой пористости.

В табл. 47 указано содержание важнейших окислов в керамических материалах рассматриваемой системы, а в табл. 48 и на рис. 28 и 54 — основные свойства этих материалов.

Стеатитовая керамика

Стеатитами называют керамические материалы, в которых основной кристаллической фазой является клиноэнстатит, а исходным сырьем служат тальковые минералы.

К тальковым минералам, используемым для изготовления высокочастотной керамики, предъявляется ряд специальных требований, в частности, они должны содержать минимальное количество посторонних окислов — железа, алюминия, кремния. Исключительное значение в технологии стеатитовой керамики имеет структура талька.

Стеатит С-4 содержит недефицитные компоненты — 60 % жженного онотского талька, 24 % сырого талька, 5 % часовъярской глины, 10 % углекислого бария и 1 % жженного глинозема.

Состав стеатита Б-17 близок к составу С-4, но минерализатором в нем служит двуокись циркония, которая способствует образованию мелкокристаллической структуры материала, что заметно повышает его механическую прочность.

Наиболее высокой механической прочностью обладает стеатит марки С-55. Особенностью этого стеатита является наличие в его составе клиноэнстатитового спека, приготовленного из талька и магнезита с таким расчетом, чтобы связать кремнезем, выделяющийся в процессе разложения талька при нагревании. В составе стеатита С-55 содержится также сырой тальк, соответствующее количество магнезита, немного глины и окись цинка в качестве минерализатора.

Шпинелевая, форстеритовая, периклазовая и кордиеритовая керамика

Эти материалы, в отличие от стеатитовой керамики, имеют сравнительно ограниченное применение.

Шпинелевая керамика марки Ш-15 используется главным образом для изготовления конденсаторов низкого напряжения. Выбор этого материала в данном случае обусловлен тем, что диэлектрические потери керамики Ш-15 ниже, чем стеатита, а диэлектрическая проницаемость ее несколько выше.

В состав шпинелевой керамики входят: спек шпинели ($\sim 75\%$), часовъярская глина (17%), минерализаторы — CaF_2 и диборат бария. Температура спекания шпинелевой керамики невысока, однако изделия из нее при обжиге легко деформируются и к ним прилипает подсыпка.

Эти дефекты в меньшей мере проявляются в случае тонкостенных заготовок трубчатых конденсаторов, обжигаемых в подвешенном состоянии.

Форстеритовая керамика применяется для изготовления изоляторов вакуумных приборов, когда требуется вакуумплотное соединение с металлом, обладающим повышенным температурным коэффициентом линейного расширения, например с медью.

Периклазовая керамика, хотя и отличается высокими электрическими свойствами, но ввиду трудностей ее технологии пока не получила промышленного применения.

Кордиеритовая керамика не используется в полях высокой частоты. Основное применение ее — для изоляции нагревательных приборов и искрогасительных камер, в которых необходима высокая термическая стойкость материала.

Материалы на основе соединений титана, циркония и олова

Материалы этих систем могут быть получены как с линейной, так и с нелинейной поляризацией. Последние относятся к сегнетоэлектрикам и будут рассмотрены отдельно в § 19.

Свойства материалов, обладающих линейной поляризацией, применяющихся для изготовления конденсаторов, указаны в табл. 49, а также на рис. 28 и 54.

Особенности технологии изготовления керамических деталей

Выбор того или иного метода изготовления керамического изделия зависит от следующих условий: свойств применяемого материала, особенностей конфигурации детали и степени массовости заказа.

Технологические процессы изготовления деталей из радиокерамики имеют целью решение трех основных задач:

1) обеспечение заданного химического и минералогического состава керамики;

2) обеспечение минимального содержания газовой фазы в плотной керамике;

3) обеспечение необходимой точности размеров деталей.

Компоненты керамической массы тщательно размалываются и перемешиваются в особых шаровых мельницах. Хороших результатов в отношении улучшения однородности керамических масс можно достичь, применяя в процессе их приготовления вакуумирование.

Керамические детали изготовляют следующими методами:

1) прессованием сухого порошка;

2) выдавливанием пластичной массы через мундштук с последующей механической обработкой заготовок в подсушенном и пропитанном состоянии;

3) штампованием на ударном прессе (пресс-формовка);

Таблица 49

Основные свойства конденсаторных керамических материалов с линейной поляризацией

Вид керамики	Перовскитовая	Рутиловая	Титано-циркониевая		Станнатная
Класс по ГОСТ	I, группа „а"	I, группа „б"	II, группа „а"	II, группа „б"	III
Обозначение материала	Т-150	Т-80	Т-40	Т-20	С-15
Основная кристаллическая фаза	$CaTiO_3$ титанат кальция (перовскит)	TiO_2 рутил	$ZrTiO_3$	$ZrTiO_3$	$CaSnO_3$
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 0,5 — 5 *Мгц*	140—150	70—80	35—40	20—25	14—16
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости в интервале температур 20—80° С при частоте 0,5—5 *Мгц*, *град*$^{-1}$	$-(1300 \pm 200)\ 10^{-6}$	$-(700 \pm 100)\ 10^{-6}$	$-(80 \pm 30)\ 10^{-6}$	$-(50 \pm 20)\ 10^{-6}$	$+(30 \pm 20)\ 10^{-6}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 *Мгц* и температуре 20 ± 5°С	$(3—4)\ 10^{-4}$	$(4—5)\ 10^{-4}$	$(3—4)\ 10^{-4}$	$(3—4)\ 10^{-4}$	$(3—4)\ 10^{-4}$
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 *Мгц* и температуре 80 ± 5°С	$(3—4)\ 10^{-4}$	$(4—5)\ 10^{-4}$	$(3—5)\ 10^{-4}$	$(4—6)\ 10^{-4}$	$(4—6)\ 10^{-4}$
Пробивная напряженность (при постоянном напряжении), *кв/мм*	10—12	10—12	8—10	8—10	10—12

Продолжение таблицы 49

Вид керамики	Перовскитовая	Рутиловая	Титано-циркониевая		Станнатная
Класс по ГОСТ	I, группа „а"	I, группа „б"	II, группа „а"	II, группа „б"	III
Обозначение материала	Т-150	Т-80	Т-40	Т-20	С-15
Удельное объемное электросопротивление при температуре 100 ± 5°С, *ом·см*	10^{12}—10^{13}	10^{11}—10^{12}	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{13}	10^{12}—10^{13}
Предел прочности при статическом изгибе, *кГ/см²*	1200—1800	1200—1500	900—1200	800—1000	800—900
Плотность, *г/см³*	3,8	3,8	5,1	4,3	4,8
Температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур + (20—100)° С, *град*$^{-1}$	(8—9) 10^{-6}	(7,5—8) 10^{-6}	(5,5—6,0) 10^{-6}	(5,5—6,0) 10^{-6}	(8—8,5) 10^{-6}
Температура обжига, °С	1360 ± 20	1360 ± 20	1430 ± 20	1450 ± 20	1380 ± 20
Основные методы оформления	Протяжка, прессование, горячее литье, литье пленок	Протяжка, прессование, литье пленок, горячее литье, литье в гипсовые формы	Протяжка, прессование, литье пленок	Прессование, протяжка	Протяжка, прессование, литье пленок

4) формованием на гончарном станке;

5) литьем жидкой керамической массы.

После придания керамическому изделию необходимой формы (любым из перечисленных методов) и его сушки производят обжиг (спекание массы), вызывающий в материале химические изменения, в результате которых материал приобретает большую твердость и повышенную плотность.

При изготовлении керамических деталей очень важно соблюдать заданную точность размеров. Следует иметь в виду, что абсолютная величина отклонения размеров от заданных значений (допуск) воз-

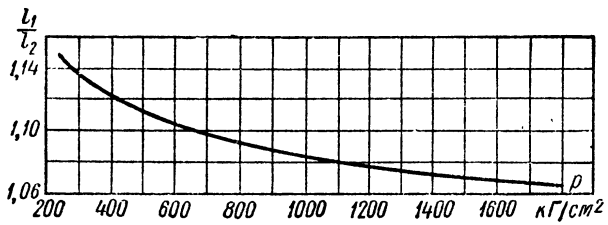


Рис. 109. Зависимость усадочного коэффициента (отношения линейного размера отформованной детали l_1 к размеру после обжига l_2) радиофарфора от удельного давления при прессовании.

растает с увеличением изделия. Обычный допуск для деталей очень малого размера лежит в пределах $\pm (0{,}1 \div 0{,}2)$ *мм*, а для средних и больших деталей допуск составляет 1,5 — 4% от линейного размера.

Большой допуск по размерам керамических изделий объясняется усадкой (в процессе сушки и обжига деталей), величина которой зависит от ряда факторов.

Чтобы получить детали с заданными допусками по размерам, необходимо выбрать правильный вариант технологического процесса их изготовления с учетом физико-химических особенностей керамической массы, ее гранулометрического состава и степени влажности. Кроме того, надо учитывать величину давления в случае прессования или выдавливания массы через мундштук и условия режима обжига.

Метод сухого прессования применяют при изготовлении плоских деталей относительно небольших размеров с незначительными выступами и углублениями. Допуск по размерам деталей в этом случае может быть принят $\pm (0{,}015\ a + 0{,}1$ *мм*), где a — линейный размер детали.

Величину усадочного коэффициента определяют вычислением отношения размеров изделия до обжига к тем же размерам после обжига. На рис. 109 показана зависимость усадочного коэффициента от удельного давления при прессовании.

Изготовление деталей методом формования пластичной керамической массы осуществляют на гончарном станке, представ-

ляющем собой вращающийся диск, посаженный на вертикальную ось. Быстро вращая ком массы на диске, ему придают посредством давления рук и шаблона необходимую форму тела вращения.

В некоторых случаях формование производят в гипсовых формах.

Отформованные изделия просушивают и подвергают дополнительной обточке резцами. Значительного ускорения обработки отформованных изделий можно достичь, производя одновременную их обточку несколькими резцами специально подобранного профиля.

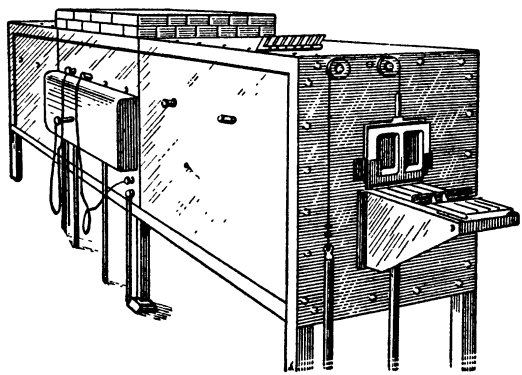


Рис. 110. Туннельная печь с электрическим обогревом для обжига керамических изделий.

Изготовление деталей методом выдавливания (протяжки) через мундштук позволяет получать изделия удлиненной формы: трубки, стержни, колодки, каркасы и пр. Полученные заготовки после просушки иногда пропитывают парафином или другой связкой для придания им повышенной прочности и уменьшения вредного выделения пыли при механической обработке.

Оформление деталей методом пластичного прессования на ударных прессах обеспечивает высокую производительность; отрицательной особенностью такого прессования является недостаточно постоянное значение усадочных коэффициентов и нередко наблюдаемая пористость обожженных изделий. В состав массы добавляют органическую связку, деготь, керосин, желатину. Детали, изготовленные таким методом, могут иметь самую разнообразную конфигурацию.

Литье керамической массы применяют при изготовлении деталей крупных размеров и сложной конфигурации, например полых изделий любой формы. При этом методе оформления заготовок жидкую керамическую массу (шликер) наливают в гипсовые формы, имеющие конфигурацию заданной детали. Стенки формы всасывают в себя влагу из шликера и на них осаждается плотный слой керамической массы необходимой толщины. Остаток шликера

сливают. После некоторой выдержки деталь извлекают из гипсовой формы, просушивают и подвергают обжигу.

В настоящее время применяется также литье под давлением нагретого шликера в металлическую форму. В этом случае приходится применять органический пластификатор, например парафин.

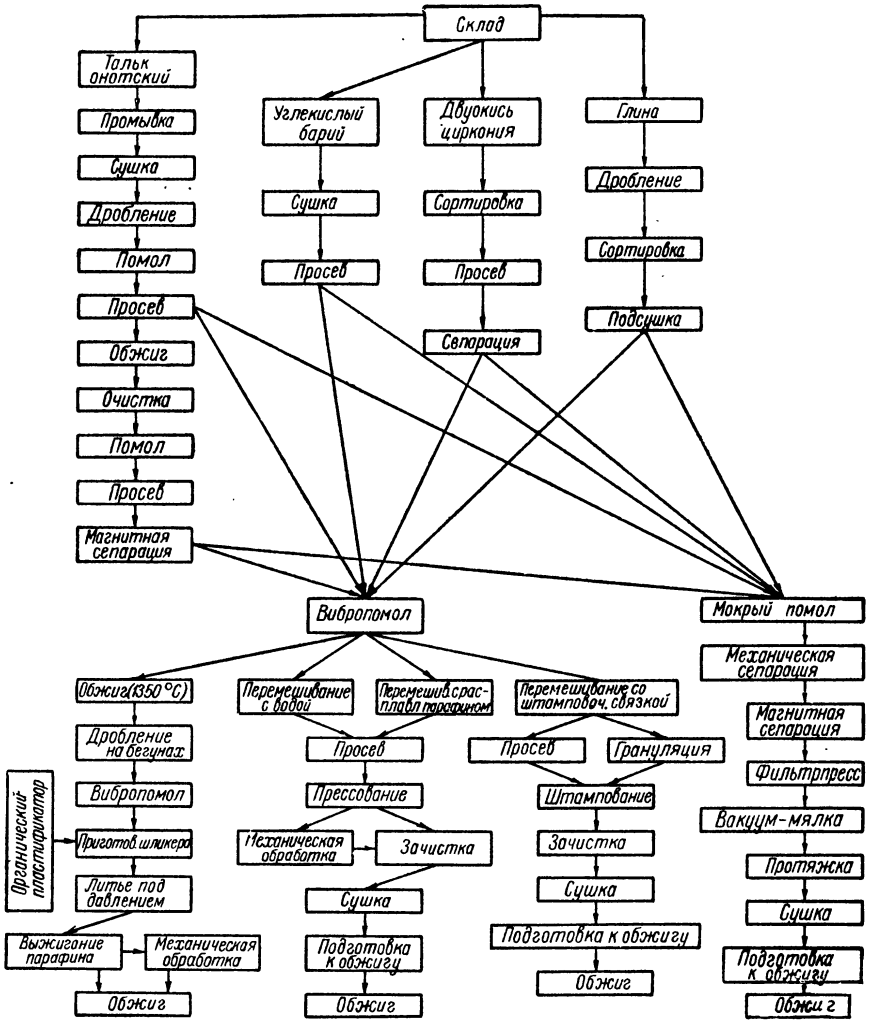


Рис. 111. Примерная технологическая схема изготовления деталей из стеатита.

Обработка керамических заготовок, высушенных и пропитанных парафином, на токарном, фрезерном и сверлильном станках позволяет получать изделия с любой конфигурацией.

Обжиг деталей является весьма ответственной операцией керамического производства. Температура и продолжительность обжига, устойчивость заданной температуры, характер газовой среды в печи (окислительная, восстановительная, нейтральная) определяют окончательную пригодность изделия.

Обжиг радиокерамических изделий производят, как правило, в туннельных конвейерных печах непрерывного действия. Детали, установленные на шамотных подложках, продвигаются на ленте конвейера через печь, попадая постепенно в зоны все более высокой температуры. В средней части печи создается наивысшая температура, соответствующая заданному интервалу спекания массы. Затем детали, по мере продвижения их к выходу из печи, попадают в зоны более низких температур. Скорость движения конвейера определяется в зависимости от сложности и конфигурации деталей.

Внешний вид конвейерной печи показан на рис. 110.

С целью придания керамическому изделию красивого внешнего вида, а также для предохранения от загрязнений на его поверхность наносят слой глазури. Состав ее выбирают с таким расчетом, чтобы она полностью остекловывалась при заданной температуре и чтобы температурный коэффициент линейного расширения ее был близок к коэффициенту расширения керамики. Механическая прочность керамического изделия, покрытого правильно выбранной глазурью, повышается приблизительно на 15 — 20%.

После обжига керамические изделия иногда дополнительно шлифуют. Тщательное шлифование позволяет обеспечить точность размеров некоторых керамических изделий (например осей со строго заданным диаметром) до $\pm 0{,}01$ *мм*.

Металлизация керамики (обычно — нанесение серебра методом вжигания) обеспечивает возможность осуществления мягкой и твердой пайки керамики с металлом, что имеет особое значение для создания герметизированных конструкций.

Вжигание серебра используется также для осуществления печатных схем на керамических основаниях и нанесение электродов на керамические заготовки конденсаторов.

В заключение на рис. 111 представлена общая схема технологического процесса изготовления деталей методами литья под давлением, прессования, штампования или протяжки через мундштук.

§ 19. Сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики и электреты

Сегнетоэлектриками называют материалы, характеризующиеся такими же особенностями поляризации, как и у сегнетовой соли. К этим особенностям следует отнести:

1) очень большую по сравнению с другими материалами степень поляризации, а следовательно, и огромное значение ε';

2) нелинейную зависимость заряда Q от величины приложенного напряжения U, чего у обычных диэлектриков не наблюдается (см. рис. 42).

Поляризация сегнетоэлектриков связана с достаточно большими затратами энергии, т. е. в переменном электрическом поле, как это видно из того же рисунка, обнаруживается гистерезисная петля „переполяризации". Нелинейная зависимость $Q=F(U)$ или, что то же самое, $D=F(E)$ свидетельствует о наличии зависимости $\varepsilon'=\varphi(E)$, тогда как в обычных диэлектриках она практически не наблюдается;

3) резкую зависимость поляризации от температуры и проявление сегнетоэлектрических свойств только в определенных температурных интервалах. В большинстве наиболее употребляющихся сегнетоэлектриков их сегнетоэлектрические свойства проявляются при всех температурах, вплоть до некоторой предельной, при которой происходит изменение структуры материала и сегнетоэлектрические свойства исчезают.

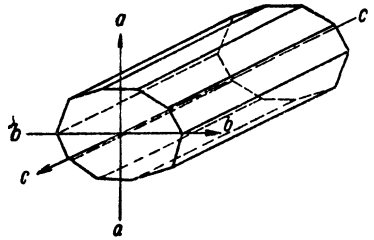


Рис. 112. Внешний вид и расположение осей в кристалле сегнетовой соли.

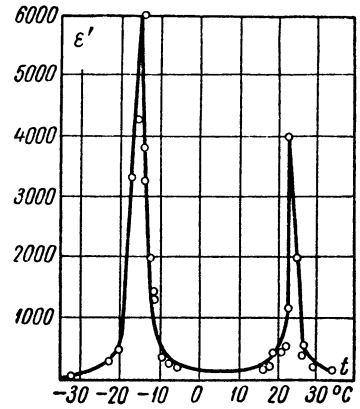


Рис. 113. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для сегнетовой соли в слабых полях.

Эту температуру называют точкой Кюри.

Таким образом, поведение сегнетоэлектриков в электрическом поле представляет собой формальную аналогию с поведением железа и других ферромагнетиков в магнитном поле.

Сегнетова соль является двойной солью натрия и калия и винной кислоты:

$$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O.$$

Она кристаллизуется в орторомбической системе (рис. 112). Сегнетова соль обладает резкой анизотропией свойств. Так, например, все ее сегнетоэлектрические свойства имеют место только вдоль кристаллографической оси a (сегнетоэлектрической оси). Вдоль других направлений все свойства сегнетовой соли нормальны и почти не отличаются от свойств других, близких к ней кристаллов.

Диэлектрическая проницаемость сегнетовой соли в направлении сегнетоэлектрической оси a непостоянна и зависит от напряженности поля, достигая при некотором его значении величины $\sim 10\,000$.

В температурной зависимости относительной диэлектрической проницаемости сегнетовой соли наблюдаются два максимума, т. е. она

имеет две точки Кюри: верхнюю при температуре +22,5°С и нижнюю при —15°С (рис. 113). Сегнетоэлектрические свойства ее проявляются в интервале температур от нижней до верхней точки Кюри. При температурах, лежащих вне этого диапазона, сегнетоэлектрические свойства не наблюдаются.

Было обнаружено, что сегнетоэлектрическими свойствами обладают изоморфные смеси сегнетовой соли с некоторыми другими солями винной кислоты, которые сами по себе не являются сегнетоэлектрическими, а также тяжелая сегнетова соль, в которой водород (в кислотном остатке и в кристаллизационной воде) заменен дейтерием D.

Была найдена также группа сегнетоэлектриков, состоящая из дигидрофосфата калия (первичного кислого фосфорнокислого калия) KH_2PO_4, той же соли с заменой в ней водорода дейтерием — KD_2PO_4 и некоторых других. В этих веществах сегнетоэлектрические свойства обусловлены особенностями водородной связи, что, между прочим, косвенно подтверждается чрезвычайно резким изменением их свойств при замене водорода дейтерием. Так, при переходе от KH_2PO_4 к KD_2PO_4 точка Кюри сдвигается на 90°С — это является примером исключительно сильного влияния изотопии на физические свойства вещества.

Сегнетова соль имеет незначительную механическую прочность и частично растворима в воде. Эти два недостатка, а также анизотропия, позволяющая вырезать образцы только в определенной плоскости, и низкое значение верхней точки Кюри ограничивают возможности использования ценных особенностей сегнетовой соли.

Керамические сегнетоэлектрики

В 1944 г. Б. М. Вулом было показано наличие сегнетоэлектрических свойств у керамического диэлектрика — титаната бария.

Титанат бария ($BaTiO_3$) имеет, как это видно из его химической формулы, несложный состав. Он получается при обжиге смеси порошкообразной двуокиси титана (TiO_2) и углекислого бария ($BaCO_3$) при температуре около 1400°С. При такой температуре углекислый барий разлагается на окись бария (BaO) и углекислый газ (CO_2), который улетучивается, а TiO_2, соединяясь с BaO, образуют поликристаллический титанат бария. Титанат бария можно получить также в виде монокристаллов.

Керамический диэлектрик — титанат бария изотропен и проявляет сегнетоэлектрические свойства по всем направлениям; он механически прочен и выдерживает сжимающие напряжения до 2000 $кГ/см^2$, не боится действия влаги и не меняет своих свойств даже после пребывания в воде.

На рис. 114 приведена зависимость ε' титаната бария от температуры. Из этого рисунка видно, что при температуре порядка 125°С имеется ярко выраженная точка Кюри, ниже которой материал обладает сегнетоэлектрическими свойствами, хотя в нем и наблюдаются

дополнительные структурные изменения (вторичные максимумы на кривых).

Зависимость электрической индукции D от напряженности поля E при $t = +22°C$, показывающая, что процесс поляризации характеризуется насыщением и соответствующая ей зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряженности поля представлены на рис. 115.

Такие особенности характеристик сегнетоэлектриков обусловлены наличием у них самопроизвольной (спонтанной) поляризации (см. § 4), связанной с особенностями их кристаллического строения.

При температуре выше $+125°C$ титанат бария обладает кристаллической структурой типа перовскита, показанной на рис. 116, *а*. Отдельные элементарные ячейки, которые образуют кристалл, имеют форму куба. В центре его расположен ион титана, в вершинах — ионы бария, а в центре каждой грани — ионы кислорода. В элементарной ячейке расстояние между центрами ионов кислорода и титана больше, чем сумма их радиусов (рис. 116, *б*). Каждый ион титана, как это видно из рис. 116, *а*, окружен шестью ионами кислорода. Поскольку расстояние между центрами ионов в ячейке больше суммы их радиусов, то ион титана имеет некоторую свободу для перемещения в пространстве между ионами кислорода.

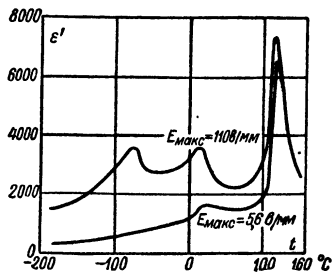


Рис. 114. Диэлектрическая проницаемость титаната бария в зависимости от температуры при различной напряженности электрического поля.

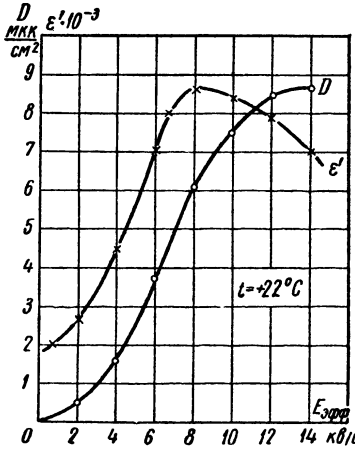


Рис. 115. Зависимости электрической индукции D и относительной диэлектрической проницаемости ε' титаната бария от напряженности электрического поля.

При высокой температуре интенсивность теплового движения становится достаточной для переброса иона титана от одного иона кислорода к другому, и нахождение титана вблизи каждого из них равновероятно. В данном случае среднее положение центра иона титана совпадает с центром симметрии ячейки, и средняя величина электрического момента каждой ячейки вследствие ее симметрии равна нулю.

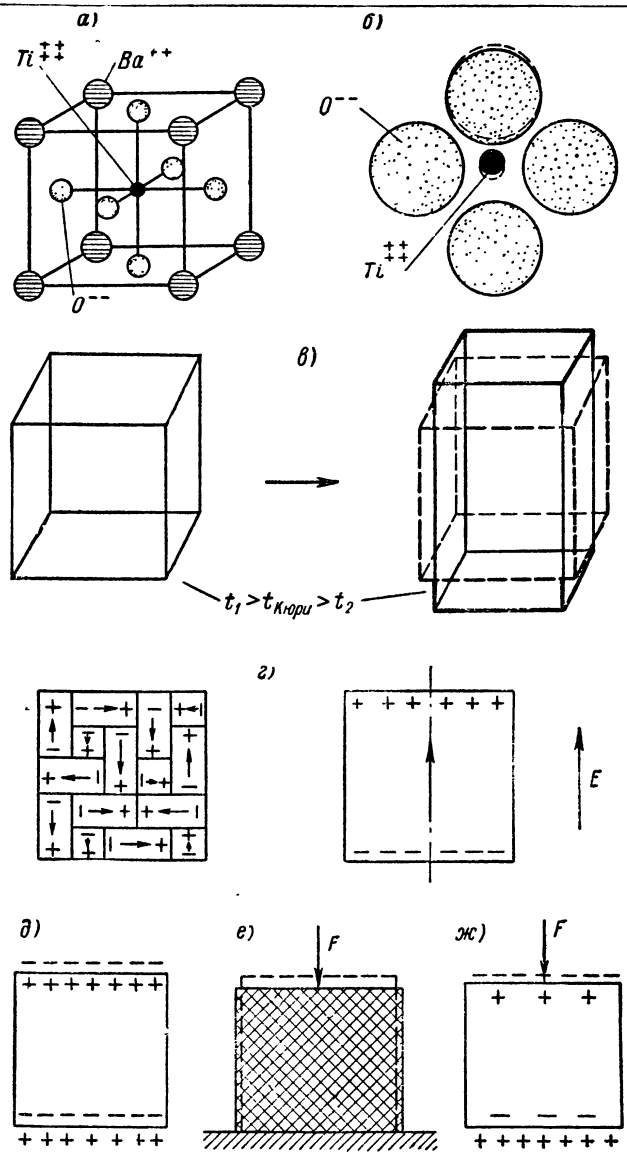


Рис. 116. Пояснение к механизму поляризации и пьезоэффекту в титанате бария.

а — элементарная кристаллическая ячейка титаната бария при температуре выше точки Кюри; *б* — смещение иона титана к одному из ионов кислорода при температуре ниже точки Кюри; *в* — изменение структуры ячейки кристалла титаната бария при температурах ниже точки Кюри; *г* — схема изменения расположения доменов в материале до и после наложения внешнего электрического поля; *д* — двойной электрический слой на поверхности титаната бария; *е* — сжатие кристалла титаната бария по оси поляризации; *ж* — появление свободного поверхностного заряда при деформации кристалла.

При температуре ниже 125°С, как показывает опыт, энергия теплового движения оказывается недостаточной для переброса иона титана между окружающими его ионами кислорода. Нахождение иона титана вблизи одного из ионов кислорода нарушает симметрию расположения заряженных частиц, образующих элементарную ячейку, и у нее возникает электрический момент. Одновременно с этим искажается форма ячейки, — она вытягивается по направлению оси, проходящей через центры ионов кислорода и титана, сблизившихся между собой, приобретая тетрагональную структуру (рис. 116, *в*).

Взаимодействие между заряженными частицами соседних ячеек приводит к тому, что смещение ионов титана происходит в них согласованно, в одном направлении, а это в свою очередь приводит к образованию доменов — областей, обладающих спонтанной поляризацией.

В каждом домене электрические моменты элементарных ячеек направлены одинаково, но отдельные домены имеют разные направления электрических моментов. При этом кристалл не создает вне себя электрического поля, что соответствует минимуму свободной энергии кристалла в целом.

Упрощенная схема расположения доменов в кристалле до наложения внешнего поля и после его воздействия представлена на рис. 116, *г*, из которого видно, что под воздействием поля кристалл становится подобен большому электрическому диполю, и на двух противоположных поверхностях, перпендикулярных к направлению электрического момента, появляются электрические заряды, равные по величине, но противоположные по знаку. Однако заряды на поверхности будут быстро нейтрализованы притянутыми к ней заряженными частицами противоположного знака, которые всегда имеются во внешней среде.

Пока существует спонтанная поляризация, „прилипшие" к поверхности заряды будут прочно удерживаться на ней связанными зарядами, выступившими изнутри, образуя вместе с ними так называемый двойной слой, как показано на рис. 116, *д*.

Когда ниже точки Кюри в кристалле возникает спонтанная поляризация, то ей сопутствует и спонтанная деформация, так как оба эти процесса взаимосвязаны.

Если поляризованный кристалл титаната бария подвергнуть внешнему механическому воздействию, например сжатию, действующему по направлению оси, совпадающей с направлением поляризации, то размеры кристалла вдоль оси уменьшатся, а в плоскости, ей перпендикулярной, — увеличатся. Изменение размеров элементарной ячейки иллюстрируется рис. 116, *е*.

Спонтанная поляризация связана с геометрическими размерами ячеек. Поэтому при уменьшении размеров вдоль указанной оси уменьшится спонтанная поляризация, а вместе с ней уменьшится на некоторую величину заряд, появившийся на поверхности при поляризации. Это приведет к тому, что равный по величине и противоположный

по знаку заряд двойного электрического слоя на поверхности окажется свободным, как это схематически показано на рис. 116, *ж*.

Появление свободных зарядов на поверхности сопровождается возникновением разности потенциалов, равной

$$U=\frac{Q}{C}, \tag{134}$$

где Q — величина заряда, освобожденного при деформации;

C — электрическая емкость кристалла.

Замкнув электроды, нанесенные на поверхности, на некоторое сопротивление, можно получить ток и таким образом превратить механическую работу в электрическую энергию. При растяжении кристалла спонтанная поляризация и соответствующая ей плотность поверхностного заряда будут увеличиваться. Некомпенсированная часть заряда на одинаковых поверхностях будет иметь знаки, противоположные тем, которые были при сжатии. Это приведет также к возникновению разности потенциалов, но противоположного знака, чем при сжатии.

Если к поляризованному кристаллу титаната бария приложить извне разность потенциалов, то это вызовет индуцированную поляризацию внутри кристалла.

В зависимости от знака разности потенциалов и направления индуцированной поляризации общая поляризация будет больше или меньше спонтанной. Но так как размеры кристалла зависят от величины поляризации, то вместе с изменением поляризации кристалл будет удлиняться при увеличении и укорачиваться при ее уменьшении. Таким образом, электрическую энергию, подводимую к кристаллу, можно превращать в энергию, запасенную в нем вследствие упругой деформации.

Рассмотренное явление называется пьезоэлектрическим эффектом.* Таким образом, сегнетоэлектрики являются также и пьезоэлектриками.

С количественной стороны материалы с пьезоэлектрическим эффектом характеризуются коэффициентом, связывающим величину заряда при пьезоэффекте с значением деформирующего усилия:

$$Q=dF;\quad \frac{Q}{S}=d\frac{F}{S}=q=dp, \tag{135}$$

где Q — заряд;

d — пьезомодуль;

F — сила;

S — поверхность;

q — заряд, приходящийся на единицу поверхности;

p — механическое напряжение в сечении пьезоэлектрика.

---

* От греческого piezo — давлю.

Таким образом, пьезомодуль d численно равен заряду, возникающему на единице поверхности пьезоэлектрика при приложении к нему единицы давления.

В литературе принято величину пьезомодулей приводить в единицах системы CGSE. Для пересчета этих значений в единицы системы MKSA можно пользоваться переводным множителем, равным $3{,}33 \cdot 10^{-5}$:

$$d\left[\text{MKSA, т. е. } \frac{\textit{кулон}}{\textit{ньютон}}\right] = \frac{Q}{F} = \frac{x \text{ ед. зар. CGSE}}{y \textit{ дин}} = \frac{\frac{x}{3 \cdot 10^9}}{\frac{y}{10^5}} = 3{,}33 \cdot 10^{-5}\, d\,[\text{CGSE}]. \qquad (136)$$

Так как в монокристаллах, обладающих анизотропией, пьезомодуль по разным направлениям различен, то поэтому величину d обозначают с индексами, указывающими направление кристаллографических осей.

Поликристаллические образцы титаната бария, вследствие хаотического расположения кристаллов и деления их на домены с различными направлениями спонтанной поляризации, не обладают пьезоэлектрическими свойствами. Только под влиянием внешнего электрического поля происходит переориентация поляризации в доменах, что приводит к появлению результирующей поляризации у образца в целом. После выключения внешнего поля в керамике сохраняется остаточная поляризация, и поликристаллический образец проявляет пьезоэффект. Поэтому и для поликристаллических образцов пьезомодуль приводят также с индексами. Направление поляризации у таких образцов может быть выбрано любым.

Характеристики пьезоэлектрических материалов на основе титаната бария и важнейшего природного пьезоэлектрика, имеющего большое значение для радиотехники, — кристаллического кварца — будут рассмотрены ниже.

Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь титаната бария в слабых полях представлена на рис. 117. Из этого рисунка видно, что диэлектрические потери у титаната бария весьма велики — особенно на высоких частотах, что ограничивает его применение. Электрическая прочность титаната бария также невысока (см. рис. 69) и снижается при более низких температурах, чем у других керамических материалов.

В настоящее время, помимо титаната бария, известно довольно большое число сегнетоэлектриков с очень высокими и очень низкими точками Кюри и различными кристаллическими структурами (например, титанат кадмия $CdTiO_3$ со структурой перовскита имеет точку Кюри —210° С, а метаниобат свинца $PbNb_2O_6$ при орторомбической структуре имеет точку Кюри +570° С).

Меняя состав керамической массы, можно также получать сегнетоэлектрики с различной диэлектрической проницаемостью и значительным смещением точки Кюри, как это видно из рис. 118.

Основные свойства промышленных керамических материалов с нелинейной поляризацией приведены в табл. 50.

В техническом применении сегнетоэлектриков наметилось несколько направлений, важнейшими из которых следует считать:

1) изготовление малогабаритных конденсаторов с большой удельной емкостью;

2) изготовление пьезоэлектрических преобразователей;

3) применение материалов с большой нелинейностью поляризации для диэлектрических усилителей, модуляторов и других управляемых устройств;

4) использование сегнетоэлементов в счетно-решающей технике в качестве запоминающих устройств.

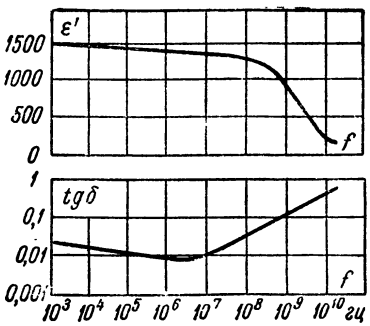


Рис. 117. Зависимость ε' и tg δ титаната бария от частоты в слабых полях.

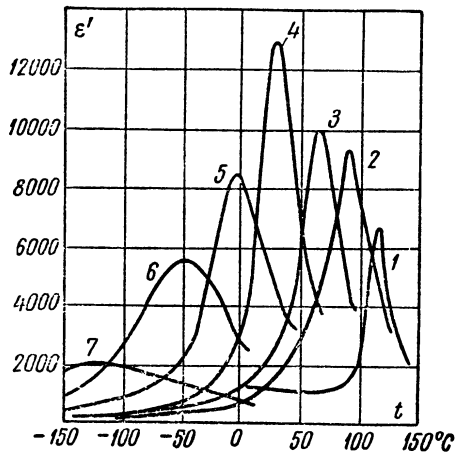


Рис. 118. Зависимости от температуры диэлектрической проницаемости твердых растворов $BaTiO_3$ — $BaZrO_3$ при частоте 1 *кгц* и напряженности поля ~ 1 *в/мм*.

1 — 100%; *2* — 90% *3* — 85%; *4* — 80%; *5* — 75%; *6* — 70%; *7* — 60% *мол* $BaTiO_3$.

Материалы для изготовления конденсаторов определены ГОСТ, и их свойства видны из табл. 44 и 50.

Для изготовления пьезоэлементов, находящих применение в микрофонах, звукоснимателях, излучателях и приемниках ультразвука, датчиках давлений, ускорений и вибраций, ГОСТ рекомендуется материал Т-1700, свойства которого приведены в табл. 50. Зависимости пьезомодуля и ε′ этого материала от температуры представлены на рис. 119.

Для устройств, управляемых электрическим полем, предназначаются материалы ВК-1 и ВК-2 („вариконды"). Принципиальная схема диэлектрического усилителя, основанного на изменении емкости нелинейного конденсатора ($C_\sim$) под влиянием поля входного сигнала $U_{вх}$, приводящем к изменению тока в нагрузке ($i_н$), показана на рис. 120.

Таблица 50

Основные свойства керамических материалов с нелинейной поляризацией

Класс по ГОСТ	VIII, группа „а"	VIII, группа „а"	VIII, группа „б"	VIII, группа „в"	Вариконд
Вид керамики	Сегнетокерамика			СВТ	Сегнетокерамика
Обозначение материала	СМ-1	Т-7500	Т-1700		ВК
Основная кристаллическая фаза	$BaTiO_3$	$BaTiO_3$	$BaTiO_3$	$SrTiO_3$	$BaTiO_3$
Относительная диэлектрическая проницаемость при 20° С	3000—4000	3000—4000	1500—1700	1000—1200	1700—2300
Изменение относительной диэлектрической проницаемости по отношению к величине ее при 20° С	До $+30\%$ -50% (в интервале $-60° \div +80°$ С)	До $+50\%$ -70% (в интервале $-60° \div +80°$ С)	До $\pm 40\%$ (в интервале $-60° \div +80°$ С)	До $\pm 25\%$ (в интервале $-60° \div +100°$ С)	При $-40°$ С не менее 20% ε' номинального; при $+60°$ С не менее 70% ε' номинального (при $U\sim=30в$)
Тангенс угла диэлектрических потерь при $f=10^3$ *гц* — до увлажнения	$\leqslant 0{,}03$	$\leqslant 0{,}03$	$\leqslant 0{,}03$	$\leqslant 0{,}002$	$\leqslant 0{,}18$
Тангенс угла диэлектрических потерь при $f=10^3$ *гц* — после увлажнения	$\leqslant 0{,}05$	$\leqslant 0{,}05$	$\leqslant 0{,}05$	$\leqslant 0{,}004$	$\leqslant 0{,}20$
Тангенс угла диэлектрических потерь при $f=10^6$ *гц*	$\sim 0{,}01$	$\sim 0{,}01$	$\sim 0{,}01$	$\sim 0{,}01$	$<0{,}05$

Продолжение таблицы 50

Класс по ГОСТ	VIII, группа „а"	VIII, группа „а"	VIII, группа „б"	VIII, группа „в"	Вариконд
Вид керамики	Сегнетокерамика			СВТ	Сегнетокерамика
Обозначение материала	СМ-1	Т-7500	Т-1700		ВК
Удельное объемное электросопротивление при температуре 100° С, *ом · см*	$\geqslant 10^{11}$	$\geqslant 5 \cdot 10^{10}$	$\geqslant 10^{10}$	$\geqslant 10^{13}$	$\geqslant 10^{10}$
Пробивная напряженность (при постоянном напряжении), *кв/мм*	$\geqslant 4$	$\geqslant 2{,}5$	$\geqslant 2{,}5$	$\geqslant 6$	$\geqslant 2{,}5$
Точка Кюри, °С	35 ± 10	35 ± 10	125 ± 10	—	80 ± 10
Пьезомодуль d_{31}, сразу после поляризации, не менее, ед. CGSE	—	—	$1{,}8 \cdot 10^{-6}$	—	—
Предел прочности при статическом изгибе, не менее *кГ/см²*	600	600	600	700	300
Плотность, *г/см³*	~5,5	~5	~5,5	~6	~6
Температура спекания, °С	1360 ± 20	1350 ± 20	1430 ± 10	1300 ± 20	1400 ± 20
Коэффициент усадки	1,10—литье 1,17—прессование	1,18—прессование	1,11—литье 1,18—прессование	~1,17—литье 1,18—прессование	1,18—1,20 прессование
Основные методы оформления	Прессование, протяжка и литье пленок	Прессование, протяжка	Прессование, протяжка и литье пленок	Прессование, литье пленок	Прессование

Для запоминающих устройств наиболее пригоден материал с возможно более прямоугольной петлей гистерезиса, что характерно для монокристаллов, однако и поликристаллические образцы некоторых составов могут удовлетворять поставленным требованиям. Принцип действия такого элемента основан на диэлектрическом гистерезисе и сводится к следующему. Если запись сведений осуществляется при

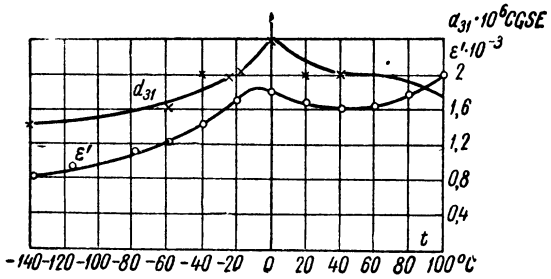


Рис. 119. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости и пьезомодуля d_{31} керамики Т-1700.

помощи положительного или отрицательного электрического импульса, то машина должна иметь соответствующие устройства, способные зафиксировать прохождение и полярность импульса, хранить эти сведения и выдавать их, т. е. различно реагировать в зависимости от полярности прошедшего импульса.

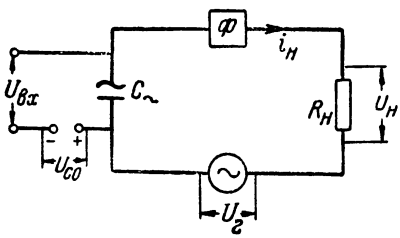


Рис. 120. Принципиальная схема диэлектрического усилителя;

$C_\sim$ — нелинейный конденсатор с сегнетоэлектриком; $U_{с.о}$ — постоянное смещение; $Ф$ — емкостный фильтр; $R_н$ — нагрузка; $U_г$ — источник питания переменного тока; $U_{вх}$ —управляющий сигнал (вход).

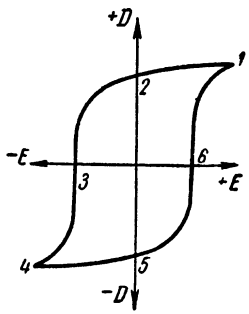


Рис. 121. Петля гистерезиса, близкая к прямоугольной.

Для приведения элемента в готовность вначале пропускают положительный импульс. В результате этого поляризация элемента достигает на петле гистерезиса, изображенной на рис. 121, точки *1* и затем, после прохождения импульса, переходит в точку *2*, так как внешнее электрическое поле равно нулю. В таком состоянии элемент подготовлен к тому, чтобы запечатлеть прохождение последующего импульса.

Если последующий импульс положителен, то поляризация вновь достигнет на петле гистерезиса точки *1* и затем опять вернется в точку *2*. Если же импульс отрицателен, то поляризация изменится, следуя по кривой *2—3—4*, и после прохождения импульса сместится в точку *5*. Установившееся состояние поляризации при этом сохраняется во времени.

Для того чтобы выявить, какой полярности импульс был зафиксирован элементом, достаточно вновь послать так называемый считывающий положительный импульс. Если ранее прошел положительный импульс и поляризация соответствует точке *2*, то при прохождении считывающего импульса поляризация изменится плавно и на очень небольшую величину, так как это изменение равно разности ординат точек *2* и *1*; поэтому и эффект, вызываемый изменением поляризациии, будет также незначителен. Если же ранее прошел отрицательный импульс и поляризация соответствует точке *5*, то при прохождении считывающего импульса поляризация будет изменяться по кривой *5—6—1*. В отличие от предыдущего случая, это изменение поляризации происходит очень резко и эффект, вызванный им, будет очень сильно отличаться.

Сегнетоэлектрические материалы с течением времени стареют; свойства материалов с высокой нелинейностью наиболее чувствительны к изменению температуры окружающей среды.

Пьезокварц

Пьезокварц нашел применение в радиотехнике для стабилизации и эталонирования частоты. В отличие от рассмотренных выше материалов, он представляет собой природные бесцветные крупные прозрачные кристаллы SiO_2 — так называемый горный хрусталь, или окрашенные — дымчатый кварц, аметист и др. Кристаллы пьезокварца можно выращивать и искусственным путем, при этом свойства их близки к характеристикам естественных кристаллов.

В аппаратуре используются кварцевые пластинки, выпиливаемые алмазными пилами из кристалла под вполне определенными углами к кристаллографическим осям кварца, так как монокристалл анизотропен и свойства его в различных направлениях весьма различны.

Известны два вида кварца: правый и левый, показанные на рис. 122. Отличие правого кварца от левого заключается в том, что сходящиеся ребра грани x, идущие к верхней пирамиде, направлены у правого — вправо, а у левого — влево. В кристалле кварца принято различать главные оси в прямоугольной системе координат X, Y, Z (рис. 123):

X — электрическую ось, проходящую через вершины шестиугольника поперечного сечения, таких осей имеется три;

Y — механическую ось, перпендикулярную к сторонам шестиугольника поперечного сечения кристалла, таких осей тоже три;

Z — оптическую ось, проходящую через вершины кристалла.

Для правого кварца применяется правая система координат, а для левого — левая.

Пьезокварцевая пластинка для получения зарядов на ее противоположных гранях под влиянием механических деформаций ни в какой предварительной поляризации не нуждается. Наибольшая величина зарядов создается в том случае, когда пластинка вырезана перпендикулярно электрической оси X. Если заряды на больших гранях пластинки образуются при действии силы по оси X, то пьезоэффект называют продольным; при этом пьезомодуль кварца $d_{11} = 6{,}9 \times 10^{-8}$ ед. CGSE. Если заряды на тех же гранях возникают в результате приложения усилий к боковым граням пластинки, то пьезоэффект называется поперечным. При изменении действующих сил (сжимающих или растягивающих) знаки электрических зарядов на гранях меняются.

Поверхности кварцевых пластин шлифуют абразивами и наносят на них

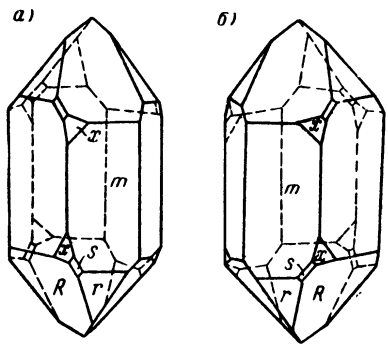


Рис. 122. Идеальная форма кристалла кварца. *а* — левый кварц; *б* — правый кварц.

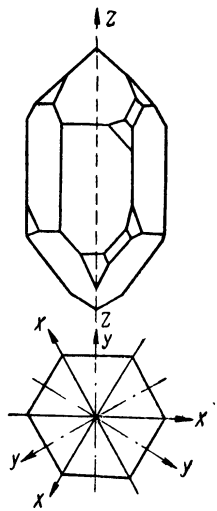


Рис. 123. Главные оси кристалла кварца.

металлические электроды методом вакуумного распыления, химического осаждения или вжигания. Пластинка с электродами и держателем представляет собой кварцевый резонатор. Он должен обладать минимальным температурным коэффициентом частоты и не создавать паразитных резонансов по обе стороны от основной резо-

Таблица 51

Физические свойства кварца

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	$г/см^3$	2,65
Твердость по Моосу	—	7
Температура плавления, °С	—	1713
Удельная теплоемкость	*кал/г·град*	0,17

нансной частоты в заданном ее диапазоне. Этим требованиям лучше всего удовлетворяют пластинки косых срезов по отношению к координатным осям, которые и выпиливаются из тела кристалла.

Перед эксплуатацией кварцевые пластинки подвергаются искусственному старению при повышенной температуре, после чего годовое изменение частоты кварцевого резонатора не превышает 10^{-6}.

Характеристики кварца приведены в табл. 51 и 52.

Таблица 52

Физические свойства кварца в различных направлениях

Направление	Коэффициент теплопроводности, $\frac{вт}{см \cdot град}$	α_l, $град^{-1}$	ρ, $ом \cdot см$	ε' при 10^6 $гц$	tg δ при 10^6 $гц$	Модуль упругости $кГ/см^2$
Вдоль оси Z . . .	0,13	$9 \cdot 10^{-6}$	10^{14}	4,6	—	10^6
Перпендикулярно оси Z	0,07	$14{,}8 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{16}$	4,4	0,0002	$0{,}8 \cdot 10^6$

Электреты

Электреты представляют собой материалы, которые, будучи поляризованы, могут в течение длительного времени сохранять состояние электризации. Таким образом, они являются формальными аналогами постоянных магнитов.

Свойство длительной электризации раньше всего наблюдали у органических диэлектриков, однако в последнее время обнаружено значительное количество керамических и даже монокристаллических (например сера) электретов.

Поверхностная плотность заряда электретов составляет 10^{-10}—10^{-8} $к/см^2$, а величина остаточной поляризации может быть 10^{-8}—10^{-5} $к/см^2$.

На рис. 124 представлены кривые зависимости заряда керамического электрета $MgTiO_3$ от времени.

В электретах имеются связанные и свободные заряды различной природы, разность которых и создает поверхностный заряд. Преобладанием того или иного заряда объясняется инверсия его знака на поверхности электрета с течением времени, показанная на рис. 124. На поверхностную электризацию электретов большое влияние оказывает давление воздуха и его относительная влажность.

Если электрет поместить между двумя металлическими обкладками (рис. 125), то величина индуцированного заряда на них будет равна:

$$q_{инд} = \frac{Kq}{\frac{\varepsilon' h_1}{h_2} + 1}, \qquad (137)$$

где h_1 — величина зазора между одной из поверхностей электрета и электродом (принимаем, что зазор между другой поверхностью и электродом бесконечно мал);

h_2 — толщина электрета;

ε' — диэлектрическая проницаемость электрета;

K — коэффициент пересчета единиц.

Очевидно, что при изменении зазора h_1 величина индуцированного заряда будет также изменяться. При периодическом изменении зазора h_1 в цепи между электродами потечет переменный ток, частота которого будет равна частоте изменения зазора. Так как внутреннее сопротивление системы электрет — электроды велико (10^7—10^8 *ом*), то величина тока не будет зависеть от внешней нагрузки, и мы получим своеобразный генератор переменного тока.

Электреты могут быть использованы для изготовления микрофо-

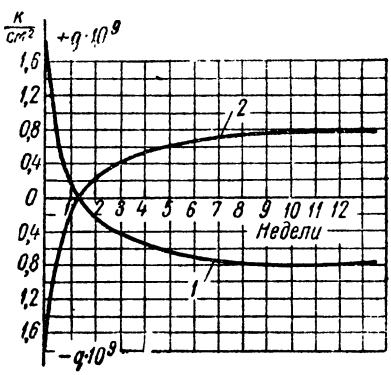


Рис. 124. Кривые зависимости заряда керамического электрета из $MgTiO_3$ от времени.

1 — сторона электрета, обращенная к минусу поляризующего напряжения; *2* — то же, к плюсу.

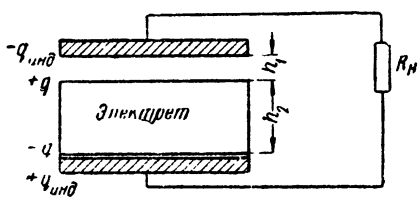


Рис. 125. Электрет в электрической цепи.

нов, измерения механических вибраций, в качестве пылеуловителей, дозиметров радиации, измерителей атмосферного давления и влажности, электрометров без источника напряжения, в электрофотографии и во многих других случаях.

§ 20. Электротехнические стекла

Неорганические аморфные термопластичные вещества — стекла — представляют собой сложные системы различных окислов. Кроме стеклообразующих окислов, т. е. таких, каждый из которых в чистом виде способен сам по себе образовывать стекло (SiO_2, B_2O_3, P_2O_5), в состав стекол входят и другие окислы: щелочные (Na_2O, K_2O), щелочно-земельные (CaO, BaO), а также PbO, ZnO, Al_2O_3 и др. Основную часть большинства технических стекол составляет SiO_2; такие стекла называются силикатными.

Свойства стекол меняются в зависимости от их состава в весьма широких пределах. На свойства стекол влияет также режим тепловой обработки.

Силикатные стекла по их электрическим свойствам (диэлектрическим потерям и электропроводности) можно подразделить на три группы:

1) щелочные стекла без тяжелых окислов или с незначительным их содержанием. Эта группа распадается на две подгруппы: а) натриевые стекла и б) калиевые и калиево-натриевые стекла. В эту группу входит большинство обычных стекол;

2) щелочные стекла с высоким содержанием тяжелых окислов, например силикатно-свинцовые и бариевые;

3) бесщелочные стекла, в которые входит также чисто кварцевое стекло (плавленый кварц).

Свойства технических стекол приведены в табл. 53 и 54. Как видно из табл. 54, прочность стекол на сжатие много больше, чем прочность на разрыв. В обычных условиях стекла весьма хрупки.

Таблица 53

Свойства стекол в зависимости от их состава

Свойства	Единица измерения	Стекла, содержащие окислы натрия	Стекла, содержащие окислы калия или калиево-натриевые	Стекла с высоким содержанием тяжелых окислов	Бесщелочные стекла (отсутствуют окислы натрия и калия)
Плотность . . .	$г/см^3$	2,2—2,75	2,2—3	2,85—4,5	2,1—3,6
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$	$град^{-1}$	2,6—5	2,6—9	2,1—3	0,5—2
Коэффициент преломления n_D	—	1,52—1,53	1,51—1,55	1,54—1,71	1,6—1,61
Удельное объемное электросопротивление при 200° С	$ом \cdot см$	10^7—10^8	10^{10}—10^{12}	10^{11}—10^{13}	10^{13}—10^{15}
Относительная диэлектрическая проницаемость . . .	—	5—7,5	5,7—7,5	7—11	3,2—8,8
Угол потерь при 10^6 *гц*:					
при 20° С . .	минуты	10—23	5—10	2—4	3—4
при 200° С . .		35—300	7—27	4—5	3—4

Закалка стекла, т. е. быстрое охлаждение, увеличивает его прочность на удар; так, закаленное особыми приемами стекло (сталинит) не только прочно, но и не образует мелких осколков при разрушении, а рассыпается в порошок.

Как и другие аморфные вещества, стекла не имеют резко выраженной температуры плавления. При нагревании вязкость стекол изме-

Таблица 54

Свойства стекол

Свойства	Единица измерения	Численное значение	Примечание
Предел прочности:			
при растяжении	*кГ/см²*	100—300	
при сжатии	„	6 000—21 000	Верхний предел — для кварцевого стекла
Температура размягчения . . .	°С	400—1 600	То же
Температурный коэффициент относительной диэлектрической проницаемости $\alpha_\varepsilon \cdot 10^6$	*град*$^{-1}$	От +30 до +500	В интервале температур от 20 до 100° С
Пробивная напряженность . . .	*кв/мм*	До 500	В однородном поле на постоянном токе

няется постепенно; за температуру размягчения стекла принимается температура, при которой вязкость его составляет 10^8—10^9 пуаз. Значения температуры размягчения стекол разного состава колеблются в пределах, указанных в табл. 54. Наиболее тугоплавким из всех стекол является чисто кварцевое стекло (100% SiO_2). Различные добавки к SiO_2, в частности щелочные окислы, существенно понижают температуру размягчения стекла.

Кварцевое стекло — это материал, имеющий наименьшую величину температурного коэффициента линейного расширения из всех известных веществ вообще; остальные стекла имеют бо́льшую величину α_l. Значения α_l обусловливают стойкость стекол к тепловым импульсам. Из величин, входящих в правую часть формулы (125), именно α_l меняется у стекол различного состава в наиболее широких пределах и имеет основное практическое значение для оценки их стойкости к резким сменам температуры. Нагретое докрасна кварцевое стекло может без вреда погружаться в ледяную воду благодаря очень малому температурному коэффициенту линейного расширения. Тонкостенные стеклянные изделия более устойчивы к резкой смене температур, чем толстостенные.

Температурный коэффициент линейного расширения стекол имеет исключительно важное значение при пайке и сварке различных стекол, при впайке металлической проволоки или ленты в стекло в электровакуумной аппаратуре, при нанесении стеклянной эмали на ту или иную поверхность. Необходимо подбирать значения α_l стекла и соединяемых с ним материалов приблизительно одинаковыми, так как иначе при изменении температуры легко может произойти растрескивание стекла, а также нарушение герметичности в месте ввода металлической проволоки сквозь стекло.

Применяемые в практике термины „вольфрамовое" и „молибденовое" стекла определяются не их составом, а тем, что значения α_l таких стекол близки к α_l вольфрама и молибдена, что весьма важно для электровакуумной техники.

Обычные стекла обладают большой прозрачностью по отношению к лучам видимой части спектра; некоторые добавки придают стеклам соответствующую окраску (CaO — синюю, Cr_2O_3 — зеленую, MnO_2 — фиолетовую и коричневую, UO_3 — желтую и пр.), что используется при изготовлении цветных стекол, эмалей и глазурей. Большинство технических стекол, вследствие содержания в них примеси окислов железа, сильно поглощает ультрафиолетовые лучи. Увиолевые стекла, содержащие менее 0,02% Fe_2O_3, прозрачны для ультрафиолетовых лучей; весьма хорошо пропускает эти лучи кварцевое стекло, которое применяется в специальных лампах ультрафиолетового излучения.

Стекла, в состав которых входят элементы с малым атомным весом, весьма прозрачны для рентгеновских лучей; таково, например, специальное стекло, содержащее 83% B_2O_3, 2,5% BeO и 14,5% Li_2O; это стекло нестойко к действию влаги, и поэтому его необходимо покрывать лаком; оно применяется для „окошек" в рентгеновских трубках, через которые рентгеновские лучи выходят наружу. Напротив, стекла с большим содержанием свинца сильно поглощают рентгеновские лучи.

Гидролитическая стойкость, т. е. стойкость к действию влаги, оценивается количеством составных частей стекла, переходящих в раствор с единицы поверхности стекла при длительном соприкосновении его с водой; растворимость стекла увеличивается при повышении температуры.

Стекла с низкой гидролитической стойкостью имеют малое удельное поверхностное электросопротивление в условиях влажной среды. Наивысшей гидролитической стойкостью обладает кварцевое стекло; при введении в стекло щелочных окислов гидролитическая стойкость его сильно снижается.

Стекла, имеющие состав $Na_2O \cdot m\,SiO_2$ (реже — $K_2O \cdot m\,SiO_2$) с величиной „силикатного модуля" m от 1,5 до 4,2, являются растворимыми стеклами; при повышенных давлении и температуре в автоклаве они полностью растворяются в воде, образуя вязкие клейкие растворы сильно щелочной реакции; такой раствор с удельным весом 1,27—1,92 при концентрации 30—50% называется жидким стеклом и широко применяется в технике.

Силикатные стекла практически устойчивы к действию кислот, за исключением плавиковой кислоты HF, которая их растворяет; стойкость этих стекол к щелочам значительно меньше.

Специальные типы стекол с высоким содержанием B_2O_3 и Al_2O_3 обладают стойкостью по отношению к парам натрия, что важно при изготовлении специальных электроосветительных приборов.

Как видно из табл. 53 и 54, электрические свойства стекол также в весьма значительной степени зависят от их состава.

Наилучшими электроизоляционными свойствами обладает кварцевое стекло; все прочие технические стекла имеют ухудшенные, по сравнению с ним, электрические характеристики. Особенно резко сказывается на уменьшении ρ и ρ_S и на увеличении $\operatorname{tg}\delta$ введение в стекло окислов щелочных металлов; наличие в силикатном стекле Na_2O более вредно, чем K_2O (рис. 126).

Зависимости удельного объемного электросопротивления от температуры стекол различного состава приведены на рис. 127.

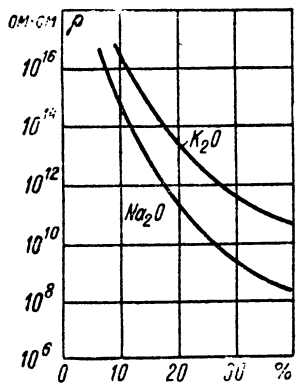


Рис. 126. Зависимость удельного объемного электросопротивления стекол SiO_2 — Na_2O и SiO_2 — K_2O от состава (по оси абсцисс отложено весовое содержание Na_2O или, соответственно, K_2O в процентах; остальное — SiO_2).

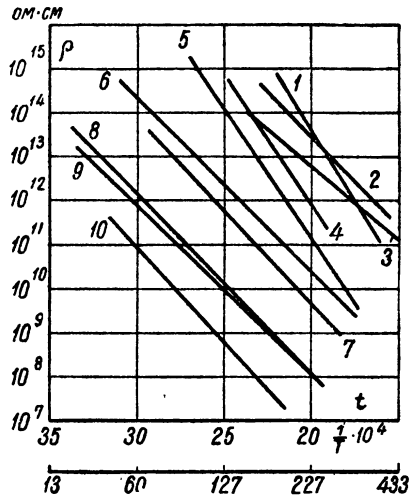


Рис. 127. Зависимость удельного объемного электросопротивления от температуры для щелочных стекол (без добавления тяжелых окислов и с тяжелыми окислами) и для бесщелочных стекол.

1 — кварцевое стекло; *2* — стекло № 24; *3* — титановое стекло; *4* — стекло № 23-л; *5* — стекло № 47; *6* — пирекс калиево-натриевый; *7* — стекло № 23; *8* — пирекс натриевый; *9* — стекло № 46-с; *10* — стекло № 65.

При воздействии на щелочное стекло постоянного напряжения происходит электролиз, который, благодаря прозрачности стекла, можно наблюдать непосредственно: при длительной выдержке его под достаточно большим напряжением, особенно при повышенной температуре, когда электропроводность стекла велика, у катода создаются отложения металла (обычно натрия) в виде характерных ветвистых образований — „дендритов".

Стекла с большим содержанием щелочных окислов, в особенности Na_2O, при отсутствии или при малом количестве K_2O и окислов тяжелых металлов, имеют значительный угол диэлектрических потерь, который при повышении температуры заметно возрастает, начиная с температур, близких к комнатной (см. рис. 55).

Одновременное присутствие в составе стекла двух различных щелочных окислов приводит к увеличению ρ и уменьшению $\operatorname{tg}\delta$ по сравнению со стеклом, содержащим только один щелочной окисел (рис. 128).

Стекла, содержащие в больших количествах окислы тяжелых металлов (PbO, BaO), отличаются низким углом диэлектрических потерь как при нормальных, так и при повышенных температурах, даже при наличии в их составе щелочных окислов. Диэлектрические потери таких стекол близки к потерям бесщелочных стекол.

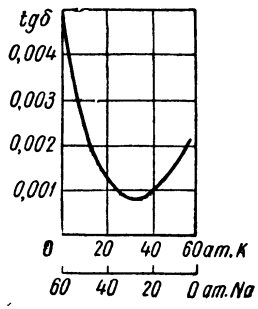


Рис. 128. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ стекол $B_2O_3 - Na_2O - K_2O$ от состава (по оси абсцисс отложено число атомов Na и K, приходящихся на 100 молекул B_2O_3; сумма атомных концентраций Na и K во всех случаях равна 60).

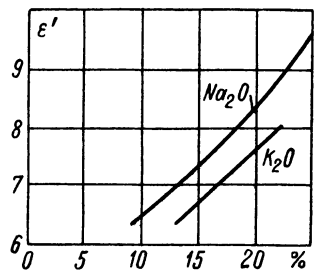


Рис. 129. Зависимость диэлектрической проницаемости стекол $SiO_2 - Na_2O$ и $SiO_2 - K_2O$ от состава (по оси абсцисс отложено весовое содержание Na_2O или, соответственно, K_2O в процентах).

Следует отметить, что при очень высоких температурах удельное объемное электросопротивление некоторых стекол с большим содержанием окиси бария BaO оказывается выше, чем у кварцевого стекла (рис. 127).

Во всех технических стеклах сильно выражены релаксационные диэлектрические потери. Так, чистый сплавленный борный ангидрид B_2O_3, имеющий ничтожно малую электропроводность, обладает заметными диэлектрическими потерями. Небольшими потерями отличается только чистое кварцевое стекло.

При значительном повышении частоты тангенс угла диэлектрических потерь большинства технических стекол возрастает (например, при 20°С для силикатного тугоплавкого стекла $\operatorname{tg}\delta$ при 1 *Мгц* равен 0,0036, а при 3000 *Мгц* он равен 0,0065; для свинцового стекла при тех же частотах — соответственно 0,0009 и 0,0044), и только у кварцевого стекла $\operatorname{tg}\delta$ не изменяется с частотой (составляя около 0,0002 как при 1 *Мгц*, так и при 3000 *Мгц*).

Как правило, стекла с большей плотностью имеют и более высо-

кие значения диэлектрической проницаемости; однако ε' зависит и от состава стекол. Так, например, содержание щелочных окислов (при этом Na_2O в большей мере, чем K_2O) повышает диэлектрическую проницаемость силикатных стекол (рис. 129).

Диэлектрическая проницаемость всех стекол возрастает с температурой. Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости различных технических стекол указан в табл. 54.

Поверхностная электропроводность сильно зависит от состояния поверхности стекла, возрастая при загрязнениях. При повышенной влажности окружающей среды поверхностная электропроводность также возрастает, особенно у стекол, обладающих поверхностной растворимостью. Зависимость ρ_s от влажности для двух стекол различного состава была представлена на рис. 39.

Пробивная напряженность стекол при электрическом пробое мало зависит от их состава. Решающее влияние на $E_{пр}$ оказывают воздушные включения — пузыри в толще стекла. При постоянном токе в однородном электрическом поле пробивная напряженность стекла весьма велика (см. табл. 54); в неоднородном поле пробой стекла в связи с краевым эффектом происходит при значительно более низких напряженностях. При высоких частотах (а при высоких температурах — также и при низких частотах и даже при постоянном напряжении) пробой стекла имеет тепловой характер.

Получение и обработка стекол

Стекло получается при быстром охлаждении расплавленного сырья, так как при медленном охлаждении расплава увеличивается вероятность перехода вещества в кристаллическое состояние; быстрое охлаждение, сопровождаемое быстрым возрастанием вязкости, приводит к тому, что молекулы вещества не успевают образовать кристаллическую решетку и остаются закрепленными в тех случайных положениях, где их застало повышение вязкости, препятствующее молекулярным перемещениям.

Стекла изготовляются („варятся") в печах. В крупном заводском производстве применяют ванные печи, а для получения небольших количеств стекла с точно выдержанным составом — горшковые печи.

Сырьем для изготовления стекол служат следующие материалы: кварцевый песок SiO_2, сода Na_2CO_3, поташ K_2CO_3, известняк $CaCO_3$, доломит $CaCO_3 \cdot MgCO_3$, сульфат натрия Na_2SO_4, бура $Na_2B_4O_7$, борная кислота H_3BO_3, сурик Pb_3O_4, каолин, полевой шпат и т. п.

Сырьевые материалы измельчают, отвешивают в нужных соотношениях и тщательно перемешивают; полученную при этом шихту загружают в стеклоплавильную печь. Здесь шихта плавится, летучие составные части (H_2O, CO_2, SO_3) из нее удаляются, а оставшиеся окислы химически реагируют между собой, в результате чего обра-

зуется однородная стекломасса, которая и идет на выработку стеклянных изделий.

Горячее стекло благодаря своей пластичности легко обрабатывается путем выдувания (ламповые баллоны, химическая посуда), вытяжки (листовое стекло, трубки, штабики), прессования, отливки и т. п.; нагретые стеклянные части приваривают друг к другу, а также к деталям из других материалов (металлы, керамика и др.). Таким образом, из стекла можно получать изделия весьма сложной конфигурации.

Листовое стекло изготовляется на машинах Фурко посредством вытягивания стеклянной полосы через шамотную щелевую фильеру, погруженную в расплавленную стекломассу; ламповые баллоны производятся на машинах-автоматах чрезвычайно большой производительности.

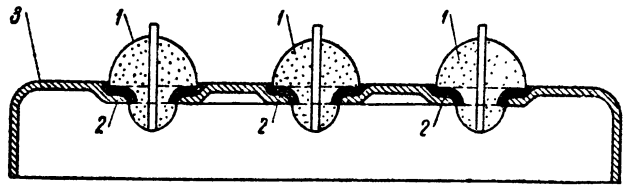


Рис. 130. Стеклянные изоляторы *(1)* со слоем вожженного серебра *(2)*, припаянные к металлической крышке *(3)*.

Изготовленные теми или иными способами стеклянные изделия должны быть подвергнуты отжигу, чтобы устранить опасные механические напряжения в стекле, возникшие при быстром и неравномерном его остывании. При отжиге изделие нагревают до некоторой достаточно высокой температуры („температура отжига"), а затем весьма медленно охлаждают.

Механическая обработка стекла в холодном состоянии сводится к резке его алмазом, шлифованию, полированию. Сверление стекла может производиться инструментами из сверхтвердых сплавов, например победита, или латунными сверлами с применением абразивов.

Матирование поверхности стекла производится путем кратковременного воздействия на нее плавиковой кислоты NF с последующей тщательной отмывкой ее. Части, на которые плавиковая кислота не должна действовать, покрываются парафином. Надписи, деления на шкалах и т. п. наносятся посредством процарапывания штрихов в соответствующих местах слоя парафина до поверхности стекла и погружения в плавиковую кислоту.

Металлизация стекла осуществляется различными способами, которые определяются особенностями изделия: нанесением металла методом возгонки в вакууме, что требует относительно сложного оборудования; вжиганием серебряной или платиновой пасты при температуре, близкой к температуре размягчения стекла; шоопированием; химическим осаждением серебра на поверхности стекла путем вос-

становления серебряного раствора при посредстве специального восстановителя.

В радиоэлектронике стекла применяют:

1) для изготовления баллонов и ножек осветительных и электронных ламп, в качестве внутриламповой изоляции, для газоразрядных приборов и рентгеновских трубок (см. рис. 146).

2) в качестве диэлектрика конденсаторов;

3) как материал для установочных и линейных изоляторов, вводов и пр. (рис. 130).

Стеклоэмали

Стеклоэмалями называются стекла, наносимые тонким слоем на поверхность металлических и других предметов с целью защиты от коррозии, а также для придания определенной окраски и улучшения их внешнего вида, создания отражающей поверхности и др. (рефлекторы, декоративные эмали и т. п.).

Эмали получаются сплавлением измельченных составных частей (шихты), выливанием расплавленной массы тонкой струей в холодную воду и последующим размолом полученной фритты на шаровой мельнице в тонкий порошок. Иногда к фритте перед ее размолом добавляются небольшие количества глины и других веществ (так называемые мельничные добавки).

Для нанесения эмали на различные изделия их нагревают в печи до соответствующей температуры и посыпают порошком фритты, которая оплавляется и покрывает их прочным стекловидным слоем; если требуется, покрытие повторяется несколько раз до получения слоя нужной толщины; во время оплавления эмалируемая деталь (например трубчатое сопротивление) может вращаться для более равномерного покрытия эмалью. Важно, чтобы температурный коэффициент линейного расширения эмали был приблизительно равен коэффициенту расширения материала, на который наносится эмаль; при заметном различии между коэффициентами расширения эмали и вещества, на поверхности эмали при резкой смене температур будут образовываться мелкие трещины (цек).

Эмаль для покрытия трубчатых сопротивлений (борносвинцовое стекло, окрашенное в коричневый цвет перекисью марганца) получается из шихты следующего состава: 27% свинцового глета PbO; 70% борной кислоты H_3BO_3; 3% перекиси марганца MnO_2. Температура размягчения этой эмали около 600° С. При длительном действии воды она белеет и частично растворяется. Для увеличения водостойкости и теплостойкости эмали к шихте добавляется кварцевый песок, что повышает температуру ее плавления.

Кроме того, стеклоэмали применяются для устройства вводов в металлические вакуумные приборы и в качестве диэлектрика в некоторых типах конденсаторов малой емкости, используемых в радиоприемной аппаратуре.

Стекловолокно

Стекло в толстом слое представляет собой хрупкий материал, но тонкие стеклянные изделия обладают повышенной гибкостью. Весьма тонкие (диаметром 4—7 *мкм*) стеклянные волокна имеют уже настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться приемами текстильной технологии. На рис. 80 была приведена зависимость предела прочности при растяжении стеклянного волокна от его диаметра. Большая гибкость и прочность стекловолокна объясняются ориентацией молекул поверхностного слоя стекла, имеющей место при вытягивании стекловолокна из расплавленной стекломассы и его быстром охлаждении.

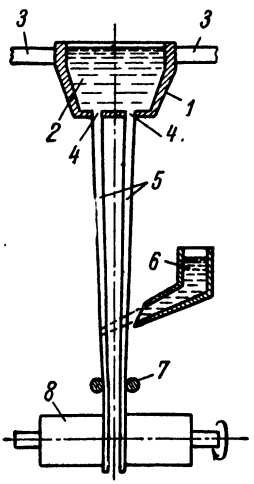


Рис. 131. Схема вытяжки тонкого стеклянного волокна.

1 — лодочка; *2* — расплавленная стекломасса; *3*— подводы тока к лодочке; *4* — отверстия; *5* — вытягиваемые элементарные волокна; *6* — замасливатель; *7*— водилка для правильной раскладки нитей на барабане; *8* — барабан.

По одному из способов стекловолокно производится следующим образом. Стекло расплавляют в изготовленной из тугоплавкого платинового сплава „лодочке" (рис. 131), которая накаливается пропусканием через нее электрического тока. На дне лодочки имеются отверстия (ф и л ь е р ы) диаметром около 1 *мм*. Расплавленная стеклянная масса под действием собственного веса медленно вытекает через отверстия в виде нитей, диаметр которых примерно равен диаметру отверстий. Выходящая из фильеры нить наматывается на быстро вращающийся барабан и увлекается им с очень большой скоростью (около 2000 *м/мин*), вследствие чего еще не успевающая полностью охладиться и затвердеть стеклянная нить вытягивается в тонкое волокно. Отдельные волокна, числом до ста — по числу фильер в лодочке (на рис. 131 для простоты показаны только две нити), соединяются друг с другом при помощи „замасливателя" в одну прядь. Благодаря ему при дальнейшей перемотке нити с барабана не происходит спутывания волокон из различных прядей.

Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткут стеклянные ткани, ленты и шланги; эти же нити используют для изоляции обмоточных проводов. Ткани и ленты из стеклянного волокна, применяемые для электрической изоляции, обычно имеют толщину 0,07—0,28 *мм*.

Преимуществами стеклянной волокнистой изоляции по сравнению с органическими волокнами являются: высокая теплостойкость, а также значительная механическая прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства.

К недостаткам стекловолокна относятся: небольшая эластичность (удлинение при разрыве — всего около 2%), пониженная по сравнению с органическими волокнами гибкость, а также малая сопротивляемость истиранию.

Стеклокерамика

В настоящее время получены стекла специальных составов, которые в результате соответствующей термической обработки в присутствии катализаторов превращаются в мелкокристаллическую керамику, известную под названием стеклокерамика (пирокерам). Отличительной особенностью такой керамики является ее исключительно высокая механическая прочность: так, предел прочности при статическом изгибе $\sigma_и = 6000 \div 7000$ *кГ/см*², а у отдельных образцов $\sigma_и$ может достигать 10 000 *кГ/см*².

Об электрических характеристиках стеклокерамики можно судить по приведенным на рис. 132 частотным зависимостям ε' и tg δ одной из ее разновидностей.

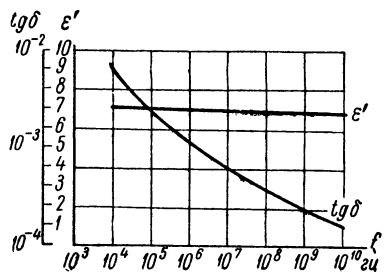


Рис. 132. Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь стеклокерамики от частоты.

§ 21. Слюда и материалы на ее основе

Слюда встречается в природе в виде кристаллов, характерной особенностью которых является способность легко расщепляться на пластинки по параллельным друг другу плоскостям („плоскостям спайности").

Богатые месторождения различных слюд расположены во многих районах Советского Союза. За рубежом наиболее крупными слюдяными месторождениями располагает Индия.

По химическому составу различные виды слюд представляют собой водные алюмосиликаты. Важнейшими из них являются: мусковит, состав которого может быть приблизительно выражен формулой

$$K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O,$$

и флогопит

$$K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O;$$

кроме того, в слюды могут входить соединения железа, натрия, кальция и др.

Мусковиты бывают бесцветными или же имеют красноватый, зеленоватый и другие оттенки; флогопиты чаще всего окрашены в более темные тона — янтарные, золотистые, коричневые до почти черных; однако иногда встречаются и весьма светлые флогопиты.

По электрическим свойствам мусковит, являющийся одним из лучших электроизоляционных материалов, стоит выше флогопита; кроме того, он несколько более прочен механически, более тверд, гибок и упруг, чем флогопит.

Сравнение свойств мусковита и флогопита дано в табл. 55.

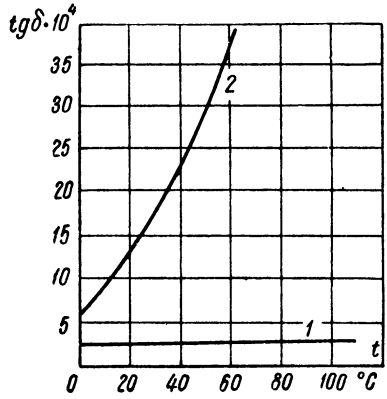


Рис. 133. Зависимость tg δ слюды-мусковита от температуры.

1 — при $f = 2$ *Мгц*; *2* — при $f = 50$ *гц*.

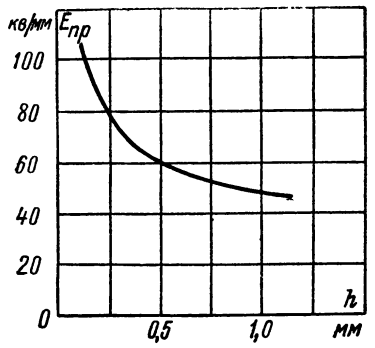


Рис 134. Зависимость пробивной напряженности слюды-мусковита в неоднородном поле от толщины.

На рис. 133 и 134 представлены типичные зависимости tg δ от температуры и $E_{пр}$ от толщины для мусковита. Диэлектрическая проницаемость слюд — порядка 6—8.

Таблица 55

Сравнение свойств мусковита и флогопита

Вид слюды	Теплостойкость, °С	ρ, *ом·см*	tg δ · 10^4 при частоте 1 *Мгц*	Плотность, *г/см*³
Мусковит	500—600	10^{14}—10^{16}	3	2,8—2,9
Флогопит	800—900	10^{13}—10^{14}	15	2,6—2,8

Приведенные в табл. 55 электрические характеристики слюд определены для случая, когда поле перпендикулярно плоскостям спайности. Вдоль плоскостей спайности электроизоляционные свойства слюды значительно ниже: ρ — всего лишь 10^9 *ом·см*; tg δ — порядка 0,1.

При достижении некоторой температуры (теплостойкость по табл. 55) из слюды начинает выделяться входящая в ее состав вода; при этом слюда теряет прозрачность, толщина ее увеличивается (слюда „вспучивается"), механические и электрические свойства ухудшаются; при дальнейшем повышении температуры эти изменения становятся

все более заметными, и кристаллическое строение слюды нарушается. Слюды плавятся лишь при температуре около 1250—1300° С.

Слюда в природе обычно сопровождается кварцем, полевым шпатом и другими минералами; она встречается в виде жил, вкрапленных в твердые горные породы, обычно пегматиты. После взрывных работ и извлечения слюды из жил она очищается от посторонних минералов и в таком виде носит название забойного сырца. Средний выход слюды из породы в виде забойного сырца составляет 1—2%, редко достигая 10%. Забойный сырец подвергают ручной разборке и раскалывают ножом на пластинки, дефекты на краях которых (глубокие трещины и т. п.) обрезают; такая слюда называется полуочищенной и расщипывается на более тонкие (от 5 до 45 *мкм*) пластинки.

Из щипаной слюды изготовляют штампованные прямоугольные пластинки для конденсаторов (конденсаторная слюда), фасонные штампованные детали для электронных и осветительных ламп, шайбы и т. п. Конденсаторная слюда — мусковит наивысшего качества (так называемая образцовая конденсаторная слюда, применяемая для изготовления образцовых измерительных конденсаторов) — согласно ГОСТ 7134-54 выпускается в виде пластин длиной от 7 до 60 *мм* и шириной от 4 до 50 *мм*; стандартные толщины этих пластин следующие: 25, 35, 45, 55 *мкм* (с допуском $\pm$ 5 *мкм*). Величина tg δ образцовой конденсаторной слюды (для пластинок толщиной 25 *мкм*) должна быть не более 0,0003 (при частоте 1 *Мгц*) и не выше 0,0025 (при частоте 1 *кгц*); ее диэлектрическая проницаемость допускается в пределах от 5,5 до 9,5.

В последние годы разработана технология производства искусственной слюды путем выращивания кристаллов из расплава шихты. Кристаллы искусственной слюды, аналогично природной слюде, легко расщепляются на тонкие листы. Искусственная слюда обладает большей теплостойкостью, чем природная, вследствие отсутствия кристаллизационной воды. Высокая чистота ее обеспечивает электрические свойства, которые превосходят свойства лучшего природного мусковита. Так, например, удельное объемное электросопротивление искусственной слюды составляет $10^{17} - 10^{18}$ *ом·см*, а tg $\delta = 0{,}0003 \div 0{,}0007$.

Микалекс представляет собой твердый материал, получаемый путем горячего прессования смеси порошкообразной слюды и тонкоразмолотого легкоплавкого стекла.

Для изготовления микалекса применяют слюду мусковит и борносвинцовые или борно-баритовые стекла. Прессование производят при температуре размягчения стекла около 600° С и удельном давлении 500—700 *кГ/см*^{2}.

Изделия из микалекса выпускают в виде листов или стержней разного сечения, которые в дальнейшем подвергают механической обработке — обточке, фрезерованию, сверлению, шлифованию.

Микалекс обладает небольшими диэлектрическими потерями, высокой теплостойкостью, влагостойкостью и механической прочностью.

Микалекс используется в радиотехнической промышленности для изготовления держателей мощных ламп, панелей воздушных конденсаторов, гребенок катушек индуктивности, плат переключателей и других деталей. Микалекс допускает запрессовку в него металлических контактов.

Свойства микалекса приведены в табл. 56.

Таблица 56

Свойства микалекса

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	$г/см^3$	2,6—3
Теплостойкость	°С	300—350
Температурный коэффициент линейного расширения	$град^{-1}$	$(8 \div 9) \cdot 10^{-6}$
Предел прочности:		
при растяжении	$кГ/см^2$	300—700
при сжатии	„	1000—4000
при изгибе	„	700—1400
Удельная ударная вязкость	$кГ \cdot см/см^2$	2—5
Удельное объемное электросопротивление	$ом \cdot см$	10^{13}—10^{14}
Удельное поверхностное электросопротивление	$ом$	10^{10}—10^{12}
Относительная диэлектрическая проницаемость	—	6—8,5
Тангенс угла потерь при 10^6 *гц*	—	0,003—0,01
Пробивная напряженность	$кв/мм$	10—20

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

ГЛАВА ПЯТАЯ

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ

§ 22. Классификация и основные свойства проводниковых материалов

Проводниками электрического тока могут служить твердые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы.

Твердыми проводниками являются металлы. Металлические проводниковые материалы могут быть разделены на материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления. Металлы с высокой проводимостью используются для изготовления проводов, кабелей, обмоток трансформаторов, волноводов, анодов мощных генераторных ламп и т. д. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются в электронагревательных приборах, лампах накаливания, реостатах, образцовых сопротивлениях и т. п.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Как правило, температура плавления металлов высока, за исключением ртути, у которой она составляет всего —39° С. Поэтому при нормальной температуре в качестве жидкого металлического проводника может быть применена только ртуть. Другие металлы являются жидкими проводниками лишь при повышенных или высоких температурах.

Механизм протекания тока по металлам в твердом и жидком состояниях обусловлен движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной проводимостью, или проводниками первого рода.

Проводниками второго рода, или электролитами, являются растворы (в основном водные) кислот, щелочей и солей. Прохождение тока через такие проводники связано с переносом вместе с электрическими зарядами частей молекул (ионов), в результате чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.

Кристаллические вещества с ионным строением в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода. Примером могут служить соляные закалочные ванны с электронагревом.

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Однако,

если напряженность поля превзошла некоторое критическое значение, обеспечившее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником, обнаруживая электронную и ионную проводимости. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов и положительных ионов в единице объема представляет собой особую равновесную проводящую среду, называемую плазмой.

Металлические проводники являются основным типом проводниковых материалов, применяемых в радиоэлектронике. Общие представления о строении металлических проводников и зонной теории электропроводности твердых тел были даны в § 3.

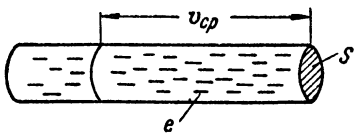


Рис. 135. Пояснение к выражению для величины тока в проводнике.

К основным характеристикам проводниковых материалов относятся:

1) удельная электропроводность или обратная ей величина — удельное электросопротивление;

2) температурный коэффициент удельного электросопротивления;

3) коэффициент теплопроводности;

4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.);

5) предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве.

Величина тока в проводнике (рис. 135) может быть представлена в следующем виде:

$$I = n_0 S v_{ср} e, \tag{138}$$

где n_0 — концентрация электронов; $v_{ср}$ — средняя скорость направленного движения электронов под действием электрического поля напряженностью E.

Вводя в последнее равенство подвижность электронов [см. выражение (61) в § 5], получаем общеизвестное выражение закона Ома:

$$I = n_0 S e v_1 E;\ i = n_0 e v_1 E;\ i = \gamma E. \tag{139}$$

Величина, обратная удельной электропроводности проводника γ, называемая удельным электросопротивлением ρ, для проводника с постоянным поперечным сечением S и длиной l вычисляется по формуле

$$\rho = R\frac{S}{l}. \tag{140}$$

Удельное электросопротивление проводников выражают в *ом·мм²/м* (измеряя S в *мм²*, а l в *м*) или в *ом·см*, *мком·см*, *ом·м* (последнее справедливо для системы единиц MKSA):

$$1\ ом\cdot см = 10^4 \frac{ом\cdot мм^2}{м} = 10^6\ мком\cdot см;\ 1\ ом\cdot м = 10^2\ ом\cdot см.$$

Диапазон удельных электросопротивлений металлических проводников довольно узок — от 0,016 для серебра и примерно до

10 *ом · мм²/м* для железо-хромо-алюминиевых сплавов, т. е. занимает всего три порядка.

В табл. 57 приведены значения удельных электросопротивлений основных электротехнических металлов.

Таблица 57

Главнейшие усредненные физические характеристики основных электротехнических металлов при 20° С

Металл	Плотность *г/см³*	Температура плавления $t_{пл}$, °С	Удельная теплоемкость *c, кал/г·град*	Коэффициент теплопроводности λ, *кал/см·сек·град*	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$ *град*$^{-1}$	Твердость по Бринеллю $H_Б$, *кГ/мм²*	Удельное электросопротивление ρ, *ом·мм²/м*	Температурный коэффициент удельного электросопротивления α_ρ, *град*$^{-1}$	Работа выхода электронов, *эв*
Медь	8,9	1083	0,092	0,93	16,5	35 ÷ 38	0,0172	0,0043	4,35
Алюминий .	2,7	657	0,220	0,5	24	25	0,028	0,0042	4,30
Железо . . .	7,8	1535	0,108	0,16	11	65	0,098	0,006	4,5
Никель . . .	8,9	1455	0,106	0,18	13	73	0,073	0,0065	5
Платина . .	21,4	1770	0,032	0,17	9	50	0,105	0,0039	6
Золото . . .	19,3	1063	0,030	0,7	14,2	18,5	0,024	0,0038	4,8
Серебро . .	10,5	951	0,056	0,99	19,3	25	0,016	0,004	4,45
Вольфрам .	19,3	3380	0,033	0,4	4,4	350	0,055	0,0046	4,5
Молибден .	10,2	2620	0,063	0,36	5,1	160	0,057	0,0046	4,2
Олово	7,3	232	0,054	0,155	23	5	0,12	0,0044	4,4
Свинец . . .	11,4	327	0,031	0,083	29	4	0,21	0,0037	—
Цинк	7,1	420	0,093	0,265	31	33	0,059	0,004	4,4
Кадмий . . .	8,65	321	0,055	0,222	30	20	0,076	0,0042	—
Ртуть	13,6	—39	0,033	0,024	61	—	0,958	0,0009	4,5
Индий	7,3	157	0,058	0,06	24,8	—	0,09	0,0047	—
Висмут . . .	9,8	271	0,03	0,019	13,4	—	1,16	0,0042	—
Тантал . . .	16,6	2977	0,034	0,13	6,5	—	0,135	0,0038	—

Величина удельного электросопротивления металлического проводника может быть выражена на основании электронной теории металлов следующим образом:

$$\rho = \frac{2mv_т}{e^2 n_0 \lambda_{ср}}, \qquad (141)$$

где m — масса электрона;

$v_т$ — средняя скорость теплового движения электрона внутри металлического проводника;

$\lambda_{ср}$ — средняя длина свободного пробега электрона.

Преобразование выражения для удельного электросопротивления на основе выводов квантовой волновой механики приводит к такой формуле:

$$\rho = \frac{h}{\left(\frac{8\pi}{3}\right)^{1/3} e^2 n_0^{2/3} \lambda_{ср}} = \frac{K}{n_0^{2/3} \lambda_{ср}}, \qquad (142)$$

где h — постоянная Планка;

$$K=\frac{h}{\left(\frac{8\pi}{3}\right)^{1/3}e^2}.$$

Выражая все величины в единицах системы CGSE, получаем ρ в единицах CGSE:

$$\rho\,[\text{CGSE}]=1{,}1\cdot 10^{-14}\rho\,[ом\cdot мм^2/м]. \qquad (143)$$

Скорость теплового движения электронов $v_т$ мало зависит от температуры, так как электронный газ в металлических проводниках находится в состоянии „вырождения". Для различных проводников эта скорость примерно одинакова. Незначительно отличаются также и концентрации свободных электронов n_0 для различных проводников; так, например, для меди и никеля эта разница составляет менее 10%. Поэтому величина удельного электросопротивления в основном зависит от средней длины свободного пробега электрона в данном проводнике, которая в свою очередь зависит от строения проводника, его структуры. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного электросопротивления.

Из выражений (139) и (142) имеем:

$$v_1=\left(\frac{8\pi}{3}\right)^{1/3}eh^{-1}n_0^{-1/3}\lambda_{ср}=K_1n_0^{-1/3}\lambda_{ср}. \qquad (144)$$

Число свободных носителей тока (концентрация электронов) с увеличением температуры в металлическом проводнике остается неизменным. Вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения электронов, т. е. уменьшается средняя длина свободного пробега и подвижность электронов понижается (144). Поэтому удельное электросопротивление металлов с повышением температуры возрастает.

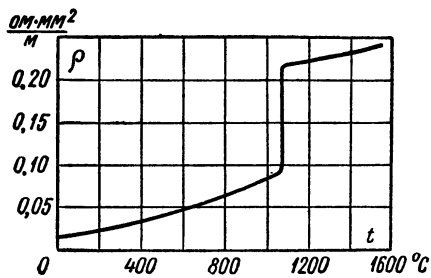


Рис. 136. Зависимость удельного электросопротивления меди от температуры. Скачок соответствует температуре плавления меди (1083° С).

Типичная кривая изменения удельного электросопротивления металлического проводника (меди) в зависимости от температуры представлена на рис. 136.

В узких диапазонах температуры, как это принято на практике, допустима прямолинейно-кусочная аппроксимация этой зависимости, и величина удельного электросопротивления в конце интересующего нас диапазона температуры t может быть подсчитана по формуле

$$\rho_t=\rho_0(1+\alpha_\rho t), \qquad (145)$$

где ρ_0 — значение удельного электросопротивления в начале диапазона.

Величина α_ρ в этом выражении называется средним температурным коэффициентом удельного электросопротивления в данном диапазоне температуры:

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 t} \; [град^{-1}]. \qquad (146)$$

Дифференциальное выражение для α_ρ при температуре t имеет вид

$$\alpha_{\rho,t} = \frac{1}{\rho_t} \cdot \frac{d\rho}{dt} \; [град^{-1}]. \qquad (147)$$

Значения α_ρ чистых металлов близки друг к другу (см. табл. 57), и поэтому приближенно можно считать:

$$\alpha_\rho \approx \frac{1}{273} \approx 0{,}004 \; град^{-1}. \qquad (148)$$

Вблизи абсолютного нуля электросопротивление начинает резко падать пропорционально абсолютной температуре в пятой степени, а ряд металлов при температурах выше абсолютного нуля переходит в сверхпроводящее состояние (теоретически нулевое электросопротивление чистые металлы должны иметь при абсолютном нуле).

В таблице 58 приведены ориентировочные значения температуры перехода ряда элементов в сверхпроводящее состояние (T_c).

Таблица 58

Температура перехода элементов в сверхпроводящее состояние

Элементы	T_c °K	Элементы	T_c °K
Ниобий	9,22	Таллий	2,38
Свинец	7,26	Торий	1,4
Лантан	4,7	Алюминий	1,14
Тантал	4,38	Галлий	1,07
Ванадий	4,3	Цинк	0,79
Ртуть	4,12	Рений	~0,9
Олово (белое)	3,69	Цирконий	~0,7
Индий	3,37	Кадмий	~0,6
		Гафний	~0,3

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного электросопротивления, хотя некоторые металлы могут и уменьшать свое электросопротивление при плавлении.

Изменение удельного электросопротивления некоторых металлов при плавлении показано в табл. 59.

Таблица 59

Изменение удельного электросопротивления некоторых металлов при плавлении

Металл	Hg	Au	Sn	Zn	Cu	Ag	Al	Na	Ga	Bi
$\frac{\rho_{жидк}}{\rho_{тверд}}$	3,2	2,28	2,10	2,09	2,07	1,9	1,64	1,45	0,58	0,43

При упругом растяжении или сжатии удельное электросопротивление приближенно может рассчитываться по следующему выражению:

$$\rho_1 = \rho(1 \pm \varphi\sigma), \qquad (149)$$

где σ — механическое напряжение в сечении образца, $кГ/мм^2$;

φ — коэффициент механического напряжения, $мм^2/кГ$.

Знак плюс в выражении (149) соответствует деформации растяжения, а знак минус берется при сжатии.

Изменение удельного электросопротивления при упругих деформациях объясняется изменением амплитуды колебания узлов кристал-

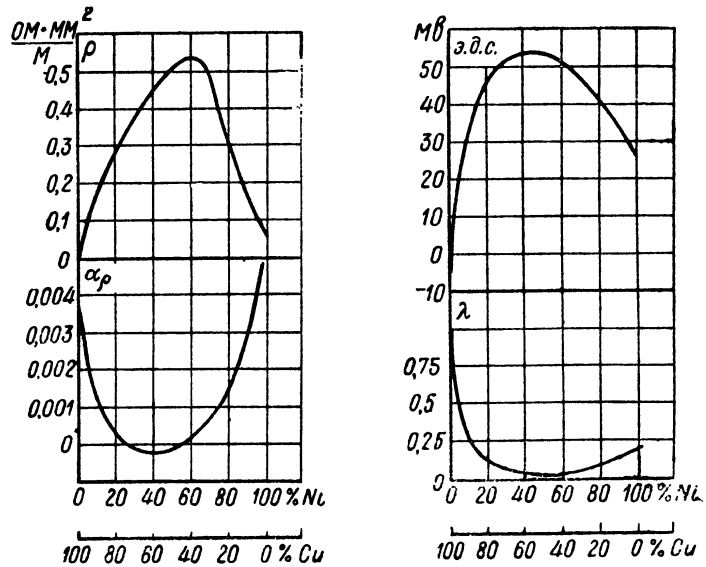


Рис. 137. Зависимость удельного электросопротивления ρ, температурного коэффициента удельного электросопротивления α_ρ, термоэлектродвижущей силы (по отношению к железу, при разности температур концов 815° С) и коэффициента теплопроводности λ $\left(\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}\right)$ от состава (в процентах по весу) для сплавов медь — никель.

лической решетки металла: при растяжении — увеличением, при сжатии — уменьшением. Пластическая деформация, как правило, повышает

удельное электросопротивление металлов вследствие искажения кристаллической решетки. При рекристаллизации путем термической обработки (отжига) удельное электросопротивление может быть вновь снижено до первоначального значения.

Наблюдающееся иногда при деформациях уменьшение удельного электросопротивления объясняется вторичными явлениями — уплотнением металла, нарушением оксидных пленок и т. д.

Чистые металлы обладают правильной кристаллической решеткой и имеют малое значение ρ. Наличие в металле даже небольших количеств примесей приводит к искажению кристаллической решетки и к увеличению удельного электросопротивления.

Возрастание ρ наблюдается не только при введении в металл неметаллических примесей, но и при сплавлении двух металлов, если они образуют друг с другом твердый раствор, т. е. создают при отвердевании совместную кристаллизацию, при которой атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого.

Зависимость удельного электросопротивления сплава двух металлов, образующих друг с другом твердый раствор, от изменения содержания каждого из них в пределах от нуля до 100% представлена графически на рис. 137 (левый верхний график). Кривая удельного электросопротивления имеет максимум, соответствующий некоторому определенному соотношению компонентов сплава, и при уменьшении содержания каждого из них удельное электросопротивление падает, приближаясь к соответствующим значениям ρ чистых металлов. Обычно при этом наблюдается определенная закономерность и в изменении α_ρ: относительно высокими значениями температурного коэффициента удельного электросопротивления обладают чистые металлы, а у сплавов α_ρ меньше и даже может приобретать небольшие отрицательные значения (рис. 137—левый нижний график).

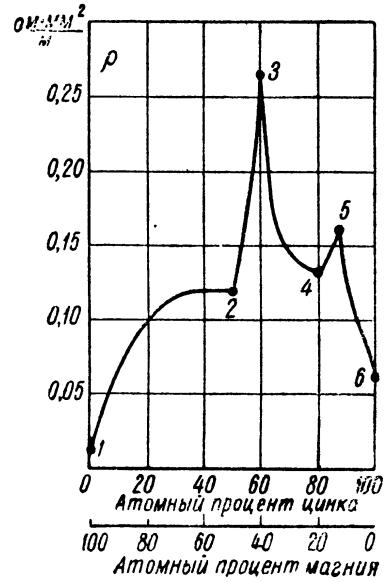


Рис. 138. Зависимость удельного электросопротивления сплавов цинк — магний от состава (по оси абсцисс — атомные проценты компонентов).

Точка *1* соответствует чистому Mg; *2* — соединению $MgZn$; *3* — Mg_2Zn_3; *4* — $MgZn_4$; *5* — $MgZn_6$; *6* — чистому Zn.

Отмеченная закономерность может нарушаться. Так, Н. С. Курнаков открыл, что в тех случаях, когда при определенном соотношении компонентов они образуют друг с другом явно выраженные химические соединения, на кривых ρ, а также α_ρ в функции состава сплава

наблюдаются характерные точки излома (рис. 138). Исследования А. Ф. Иоффе и его сотрудников показали, что большинство из этих сплавов является не металлами, а электронными полупроводниками.

В том случае, когда сплав двух металлов создает раздельную кристаллизацию и структура застывшего сплава представляет собой смесь кристаллов каждого из компонентов (т. е. если эти металлы не образуют твердого раствора), то закономерность, показанная на рис. 137, не наблюдается; удельное электросопротивление сплава изменяется линейно с изменением состава, т. е. возрастает пропорционально содержанию металла с бо́льшим значением ρ. В таких сплавах искажение кристаллической решетки не имеет места.

В § 2 указывалось, что при повышенных частотах электромагнитное поле проникает в технический проводник на небольшую глубину [формула (31)]. Подавляющая часть тока оказывается при этом сосредоточенной у поверхности проводника (скин-эффект). Если радиус кривизны поверхности проводника велик по сравнению с глубиной, на которой сосредоточена основная часть тока, то его можно рассматривать как бесконечное полупространство, заполненное веществом.

Приняв для проводящего полупространства направление тока за ось X, нормаль к поверхности — за ось Z и считая, что распределение остается неизменным вдоль осей X и Y, получим следующее уравнение для распределения плотностей тока:

$$\frac{i_X}{i_0} = e^{-\frac{Z}{\Delta}} e^{-j\frac{Z}{\Delta}}, \qquad (150)$$

где Δ — глубина проникновения. При $Z=0$, $i_X = i_0$.

Из выражения (150) следует, что плотность тока уменьшается по экспоненте с увеличением глубины Z, а глубина проникновения Δ численно равна той глубине, на которой плотность тока уменьшается до величины $1/e$, т. е. примерно до 37% своего значения на поверхности проводника. Фаза тока также меняется с глубиной в соответствии с множителем $e^{-j\frac{Z}{\Delta}}$.

В радиотехнике пользуются величиной электросопротивления квадрата поверхности проводника R_S, величина которого для плоского проводника бесконечной толщины определяется из выражения

$$R_S = \frac{1}{\gamma\Delta} \text{ [ом]}. \qquad (151)$$

Выражение (151) показывает, что активное электросопротивление плоского проводника бесконечной толщины при скин-эффекте в точности равно электросопротивлению плоского проводника толщиной Δ для постоянного тока или, что то же самое, — активное электросопротивление проводника с экспоненциально убывающим распределением плотности тока равно электросопротивлению проводника толщиной Δ с равномерным распределением тока.

Значения электросопротивления R_S и глубины проникновения Δ для некоторых важнейших металлов и сплавов в зависимости от частоты приведены на рис. 139. В табл. 60, кроме того, приведены подсчитанные по выражению (30) фазовые скорости распространения

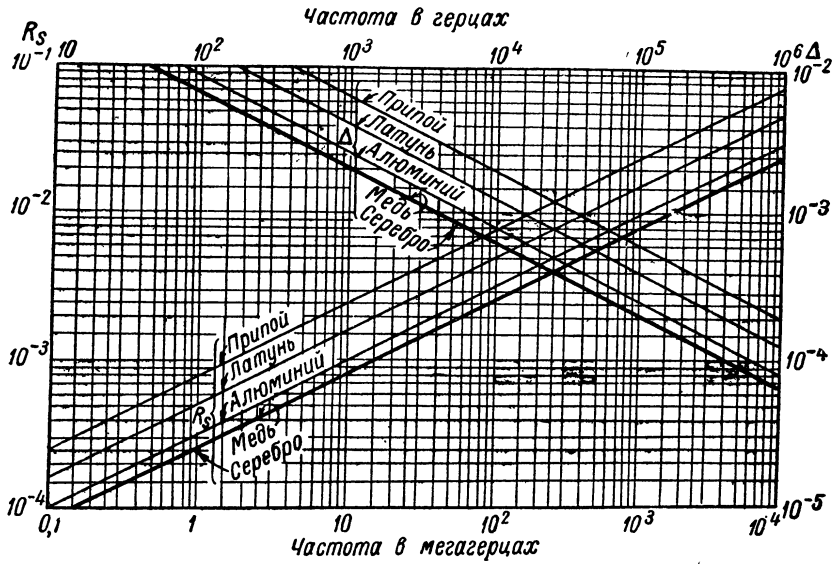


Рис. 139. Характеристики скин-эффекта для плоских проводников.

R_S — электросопротивление при скин-эффекте в омах (при отсчете частоты по нижней шкале в мегагерцах R_S отсчитывается непосредственно. При отсчете частоты по верхней шкале в герцах отсчет R_S умножать на 10^{-2}).

Δ — глубина проникновения в сантиметрах (при отсчете частоты по нижней шкале в мегагерцах Δ отсчитывается непосредственно; при отсчете частоты по верхней шкале в герцах отсчет умножать на 10^2).

волн в основных проводниковых металлах при различных частотах и соответствующие длины волн, определенные согласно выражению $\lambda = \frac{v}{f}$.

Теплопроводность металлических проводников связана с их электропроводностью. Большая теплопроводность металлов обусловлена тем, что передача тепла в них осуществляется свободными электронами проводимости — электронным газом.

Между законом Ома и уравнением Фурье [см. выражение (130) в § 9] существует формальная аналогия.

По экспериментальному закону Видемана — Франца отношение коэффициента теплопроводности к удельной электропроводности будет:

$$\frac{\lambda_т}{\gamma} = aT. \qquad (152)$$

Таблица 60

Электромагнитные параметры основных проводниковых металлов при различных частотах

Наименование металла и его характеристика	Частота, *гц*	Фазовая скорость, *м/сек*	Длина волны, *м*
Медь $\gamma = 5{,}8 \cdot 10^7$ *ом*$^{-1} \cdot$ *м*$^{-1}$ $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн/м*	50	2,94	$5{,}9 \cdot 10^{-2}$
	800	11,7	$1{,}15 \cdot 10^{-2}$
	10^6	415	$4{,}15 \cdot 10^{-4}$
	10^{10}	41500	$4{,}15 \cdot 10^{-6}$
Алюминий $\gamma = 3{,}5 \cdot 10^7$ *ом*$^{-1} \cdot$ *м*$^{-1}$ $\mu = \mu_0$	50	3,78	$7{,}6 \cdot 10^{-2}$
	800	15,1	$1{,}9 \cdot 10^{-2}$
	10^6	535	$5{,}35 \cdot 10^{-4}$
	10^{10}	53500	$5{,}35 \cdot 10^{-6}$
Сталь $\gamma = 10^7$ *ом*$^{-1} \cdot$ *м*$^{-1}$ $\mu = 10^3 \mu_0$	50	0,224	$4{,}5 \cdot 10^{-3}$
	800	0,896	$1{,}12 \cdot 10^{-3}$
	10^6	31,6	$3{,}16 \cdot 10^{-5}$
	10^{10}	31600	$3{,}16 \cdot 10^{-7}$

На основании выводов классической электронной теории металлов коэффициент (константа) a для большинства металлов одинаков и равен:

$$a = 3\left(\frac{k}{e}\right)^2 = 2{,}23 \cdot 10^{-8}, \qquad (153)$$

если $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ *дж/град* и $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ *k*.

Значения константы a для различных металлов при нормальной температуре и выражении коэффициента теплопроводности в *вт/град·см*, а удельной электропроводности в *ом*$^{-1} \cdot$ *см*$^{-1}$ приведены в табл. 61.

Таблица 61

Константа Видемана — Франца некоторых металлов

Наименование металла	$a \cdot 10^8$, *в*^{2}*/град*^{2}	Наименование металла	$a \cdot 10^8$, *в*^{2}*/град*^{2}
Алюминий	2,1	Свинец	2,5
Медь	2,25	Олово	2,5
Серебро	2,35	Платина	2,6
Цинк	2,45	Железо	2,9

При соприкосновении двух различных металлов между ними возникает разность потенциалов. Причина контактной разности потенциалов заключается в различных значениях работы выхода электронов из металлов (см. табл. 57), а также в том, что число свободных электронов, а следовательно, и давление электронного газа у разных металлов и сплавов могут быть неодинаковыми.

Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов между металлами A и B равна:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \qquad (154)$$

где U_A и U_B — потенциалы соприкасающихся металлов;

n_{0A} и n_{0B} — числа электронов в единице объема металлов A и B.

Контактная разность потенциалов для различных пар колеблется в пределах от десятых долей вольта до нескольких вольт. Если

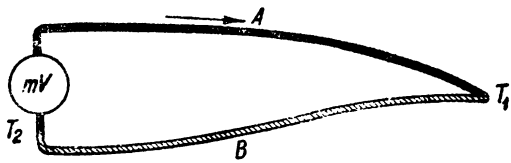


Рис. 140. Схема устройства термопары.

температуры спаев одинаковы, то сумма разностей потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Иначе обстоит дело, когда один из спаев имеет температуру T_1, а другой — T_2 (рис. 140). В этом случае возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.):

$$U = U_{AB} + U_{BA} = U_B - U_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + U_A - U_B + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}}, \qquad (155)$$

откуда

$$U = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} = A (T_1 - T_2). \qquad (156)$$

Полученное выражение показывает, что термо-э. д. с. является функцией разности температур.

Подобрав две проволоки, имеющие большую термо-э. д. с., можно воспользоваться ими для измерения температур (термопары). В измерительных приборах и образцовых сопротивлениях стремятся применять металлы и сплавы с возможно меньшей термо-э. д. с. относительно меди, чтобы не вносить погрешности в измерения. Существуют пары, меняющие знак э. д. с. в процессе нагревания.

Для изготовления термопар применяют следующие сплавы:

1) копель (56% Cu и 44% Ni);
2) алюмель (95% Ni, остальное — Al, Si и Mg);
3) хромель (90% Ni и 10% Cr);
4) платинородий (90% Pt и 10% Rh).

На рис. 141 приведены кривые зависимости термо-э. д. с. от разности температур горячего и холодного спаев для наиболее употребительных термопар.

Термопары могут применяться для измерения следующих температур:
платина — платинородий до 1600° С;
медь — константан и медь — копель до 350°С;
железо — константан, железо — копель и хромель — копель до 600°С;
хромель — алюмель до 900—1000° С.

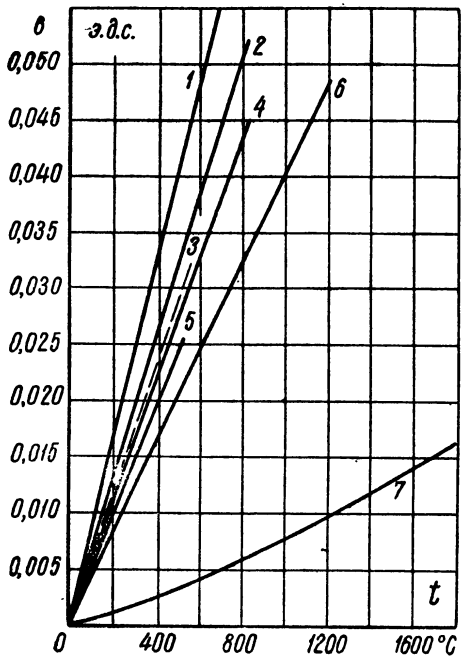


Рис. 141. Зависимость термоэлектродвижущей силы от разности температур горячего и холодного спаев для термопар: хромель — копель (кривая *1*); железо — копель (кривая *2*); медь — копель (*3*); железо — константан (*4*); медь — константан (*5*); хромель — алюмель (*6*); платинородий — платина (*7*).

Из практически применяемых термопар, как видно из рис. 141, наибольшую термо-э. д. с. при данной разности температур развивает термопара хромель-копель. Знак термо-э. д. с. у приведенных на рис. 141 термопар таков, что в холодном спае ток идет от первого названного в паре материала ко второму (т. е. от хромеля к копелю, от меди к константану и т. д.), а в горячем спае — в обратном направлении.

Температурный коэффициент линейного расширения металлических проводников

$$\alpha_l = \frac{1}{l_t} \cdot \frac{dl}{dt} \ [град^{-1}] \quad (157)$$

интересен не только с точки зрения сопряженной работы различных материалов в той или иной конструкции, в вакуумплотных соединениях со стеклами, керамикой, но он необходим также и для расчета температурного коэффициента электросопротивления проводников:

$$\alpha_R = \alpha_\rho - \alpha_l. \quad (158)$$

Между величиной температурного коэффициента линейного расширения и температурой плавления металлов наблюдается закономерная связь. Так, металлы, обладающие повышенными значениями α_l, плавятся при низких температурах, а металлы с малым α_l — тугоплавки.

Остальные физические характеристики проводников, такие, как теплоемкость, плотность, температура плавления и т. д., общеизвестны и не требуют специальных пояснений.

Механические свойства проводниковых материалов обычно характеризуют пределом прочности при растяжении $\sigma_р$ и относительным удлинением при разрыве $\Delta l/l$.

На рис. 142 представлены две кривые растяжения проволоки из проводникового материала: первая относится к твердотянутому образцу, а вторая — к отожженному. Влияние отжига, как видно из рисунка, сводится к уменьшению предела прочности при растяжении в 1,5—2 раза и увеличению относительного удлинения при разрыве в 15—20 раз.

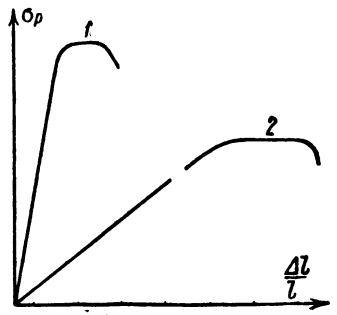


Рис. 142. Зависимость предела прочности при растяжении проволоки от относительного удлинения.
1 — твердотянутая; *2* — отожженная.

§ 23. Материалы высокой проводимости

К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести следующие металлы: медь, алюминий и железо.

Медь

Преимуществами меди, обеспечивающими ей широкое применение в качестве проводникового материала, являются:

1) малое удельное электросопротивление (из всех металлов только серебро имеет несколько меньшее удельное электросопротивление, чем медь, но высокая стоимость серебра, естественно, исключает возможность его широкого использования);

2) достаточно высокая механическая прочность;

3) удовлетворительная в большинстве случаев применения стойкость по отношению к коррозии (медь окисляется на воздухе, даже в условиях высокой влажности, значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах, см. рис. 143);

4) хорошая обрабатываемость — медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра;

5) относительная легкость пайки и сварки.

Медь имеет характерный красноватый цвет, отличающий ее от других металлов по внешнему виду.

Стандартная медь, по отношению к которой выражают в процентах удельные электропроводности металлов и сплавов в отожженном состоянии при 20° С, имеет удельную электропроводность 58 $м/ом \cdot мм^2$, т. е. $\rho = 0{,}017241$ $ом \cdot мм^2/м$.

Электропроводность меди — характеристика, весьма чувствительная к наличию примесей. Так, например, при содержании в меди

0,5% примеси Zn, Cd или Ag удельная электропроводность ее снижается на 5%. При том же содержании Ni, Sn или Al удельная электропроводность меди падает на 25—40%. Еще более сильное влияние оказывают примеси Be, As, Fe, Si или P, снижающие удельную электропроводность ее на 55% и более.

Поэтому в качестве проводникового материала используется только подвергнутая электролитической очистке медь марки М1, содержащая не менее 99,9% Cu. Полученные после электролиза катодные пластины меди переплавляют в болванки весом 80—90 *кГ*, которые на заводах прокатывают и протягивают в изделия требующегося поперечного сечения. При изготовлении проволоки болванки сперва подвергают горячей прокатке в так называемую катанку диаметром 6,5—7,2 *мм*; затем катанку протравливают в слабом растворе серной кислоты, чтобы удалить с ее поверхности окись меди CuO, образовавшуюся при нагреве, и затем уже протягивают без подогрева в проволоку нужных диаметров — до 0,03—0,02 *мм*.

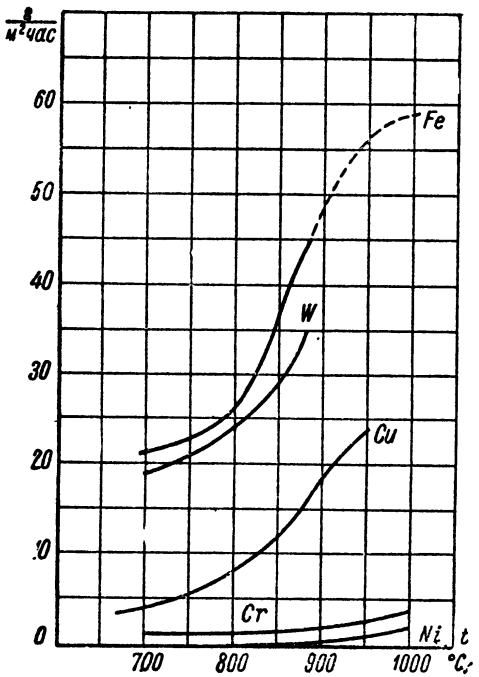


Рис. 143. Зависимость скорости окисления от температуры для железа, вольфрама, меди, хрома, никеля (на воздухе).

Присутствие в меди кислорода увеличивает ее хрупкость; особенно хорошими механическими свойствами обладает так называемая бескислородная медь марки М0, в составе которой содержится не более 0,05% примесей, в том числе не свыше 0,02% кислорода. Такую медь получают при осуществлении специального режима плавки и разливки ее в вертикальные изложницы в атмосфере окиси углерода. Из бескислородной меди может быть изготовлена наиболее тонкая проволока.

При холодной протяжке получают твердую (твердотянутую) медь, которая благодаря влиянию наклепа имеет высокий предел прочности при растяжении при малом удлинении, а также твердость и упругость — при изгибе; проволока из твердой меди несколько пружинит.

Если же медь подвергнуть отжигу, т. е. нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая

(отожженная) медь, которая сравнительно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение при разрыве и (в соответствии с рассмотренными выше общими закономерностями) более высокую удельную электропроводность.

Отжиг меди производят в специальных печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления. Влияние отжига на свойства меди

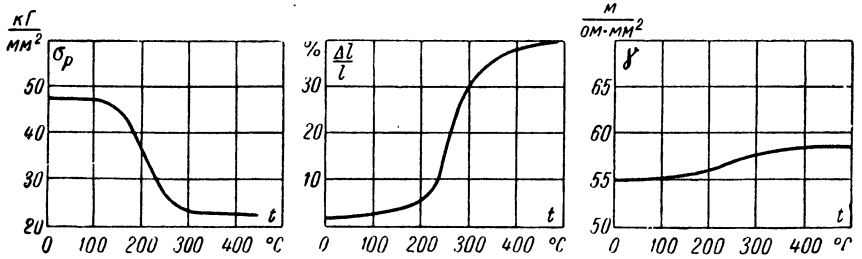


Рис. 144. Зависимость предела прочности при растяжении $\sigma_р$, относительного удлинения перед разрывом $\frac{\Delta l}{l}$ и удельной электропроводности γ меди от температуры отжига (проволока диаметром 3 *мм*; продолжительность отжига 0,5 *час*).

иллюстрирует рис. 144; так, изменение механических свойств при отжиге оказывается значительно более резким, чем изменение удельной электропроводности.

Свойства медной проволоки в соответствии с ГОСТ В 2112-46 указаны в табл. 62.

Таблица 62

Свойства медной и алюминиевой проволоки

Свойства	Единица измерения	Медь		Алюминий	
		МТ	ММ	АТ	АМ
Предел прочности при растяжении, не менее	*кГ/мм²*	36—39	26—28	16—17	8
Относительное удлинение перед разрывом, не менее	%	0,5—2,5	18—35	1,5—2	10—18
Удельное электросопротивление, не более . .	*ом·мм²/м*	0,0179—0,0182	0,01754	0,0295	0,0295

Примечание. Удельная электропроводность особо чистого алюминия может доходить до 38 *м/ом·мм²*.

Температурный коэффициент удельного электросопротивления как твердой, так и мягкой меди практически одинаков (см. табл. 57). Высокочастотные свойства меди приведены в § 22.

Твердую медь употребляют там, где надо обеспечить особенно высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию; мягкую медь применяют в тех случаях, когда важна гибкость, а прочность на разрыв не имеет столь существенного значения.

Сплавы меди. В отдельных случаях помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы, содержащие небольшие количества олова, кремния, фосфора, бериллия, хрома, магния, кадмия и пр. Такие сплавы, называемые в практике бронзами, при правильно подобранном составе обладают более высокими механическими свойствами, чем медь; так, предел прочности при растяжении

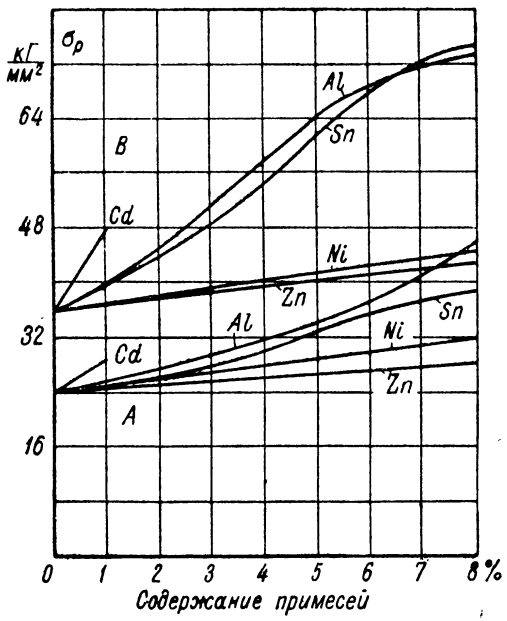


Рис. 145. Влияние содержания примесей на предел прочности при растяжении сплавов меди в отожженном (*A*) и в холоднотянутом (*B*) состояниях.

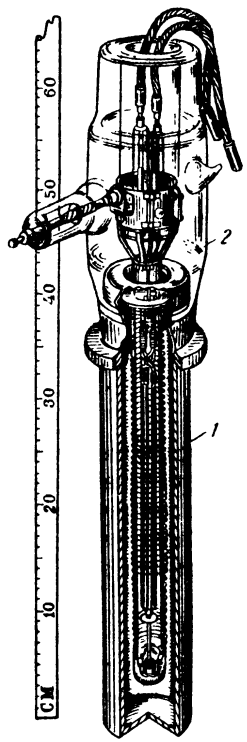


Рис. 146. Мощная генераторная лампа.

1 — анод — медь; 2 — баллон — стекло.

бронз может доходить до 80—135 $кГ/мм^2$ и более. Удельное электросопротивление бронз больше, чем у чистой меди. Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин.

Весьма удачным оказывается использование в качестве присадки к меди кадмия; эта присадка при сравнительно малом уменьшении электропроводности приводит к значительному повышению механической прочности и твердости (рис. 145). Еще большей механической прочностью обладает бериллиевая бронза (до 135 $кГ/мм^2$).

Представление о составе и свойствах некоторых медных электротехнических сплавов дает табл. 63.

В Советском Союзе имеются большие запасы медных руд. Тем не менее, учитывая значительную потребность народного хозяйства в меди, она должна расходоваться весьма экономно, и там, где это возможно, ее надо заменять другими материалами. Всякого рода отходы меди необходимо тщательно собирать; важно не смешивать их с другими металлами, а также с менее чистой (не электротехнической) медью, чтобы можно было подвергнуть эти отходы переплавке и вновь использовать в качестве электротехнической меди.

Алюминий

Вторым по значению (после меди) проводниковым материалом является алюминий. Это металл серебристо-белого цвета, важнейший представитель так называемых легких металлов (см. табл. 57). Алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Температурный коэффициент линейного расширения, теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем у меди.

Вследствие высоких значений теплоемкости и теплоты плавления, для нагрева алюминия до температуры плавления и перевода в расплавленное состояние требуется большая затрата тепла, чем для нагрева и расплавления такого же количества меди, хотя температура плавления алюминия ниже, чем меди.

Для электротехнических целей используют алюминий, содержащий не более 0,5% примесей. Еще более чистый алюминий (не более 0,05% примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов электролитических конденсаторов (рис. 148, *а* и *б*).

Прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны соответствующим операциям для меди. Из алюминия может прокатываться очень тонкая (до 6—7 *мкм*) фольга, применяемая в качестве обкладок в бумажных конденсаторах. Из алюминия изготовляются также пластины конденсаторов переменной емкости (рис. 148, *в*).

Марки алюминия и требования к его чистоте регламентируются ГОСТ 3549-55. Свойства алюминиевой проволоки даны в табл. 62.

Алюминий обладает по сравнению с медью пониженными свойствами — как механическими, так и электрическими. При одинаковых сечении и длине электросопротивление алюминиевого провода больше, чем медного, в $0{,}0295 : 0{,}0175 = 1{,}68$ раза. Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электросопротивления, как и медный, нужно взять его сечение в 1,68 раза большим, т. е. его диаметр должен быть в $\sqrt{1{,}68} \approx 1{,}3$ больше диаметра медного провода. Отсюда понятно, что если мы ограничены габаритами, то замена меди алюминием в данном случае затруднена; стоимость изоляции, зависящая от периметра сечения проводника, при применении алюминия будет выше, чем при использовании меди.

Алюминий весьма активно окисляется и покрывается тонкой пленкой окиси с большим электросопротивлением. Такая пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное электросопротивление в местах контакта алюминиевых проводов и делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Поэтому для пайки алюминия применяются специальные пасты-припои или используются ультразвуковые паяльники.

Более толстый слой окисла, который может уже создать надежную электрическую изоляцию на сравнительно высокие напряжения, получают с помощью электрохимической обработки алюминия.

Оксидная изоляция весьма прочна механически и теплостойка (температура плавления Al_2O_3 — близка к 2000° С). Она может быть сравнительно весьма тонкой (оксидный слой толщиной 0,03 *мм* имеет пробивное напряжение порядка 100 *в*, а толщиной 0,04 *мм* — около 250 *в*).

Из оксидированного алюминия могут изготовляться различные катушки без дополнительной междувитковой и междуслойной изоляции. Недостатками оксидной изоляции проводов являются ее ограниченная гибкость (особенно при большой толщине оксидного слоя) и заметная гигроскопичность (в тех случаях, когда не требуется большой теплостойкости оксидной изоляции, ее покрывают лаком).

Наиболее широкое применение оксидная изоляция получила в электролитических конденсаторах; она может использоваться также в некоторых типах выпрямителей и разрядников.

Важное практическое значение имеет вопрос о возможности гальванической коррозии в местах контакта алюминия и меди. Если область контакта подвергается действию влаги, то возникает местная гальваническая пара с довольно высоким значением э. д. с., причем полярность этой пары такова, что на внешней поверхности контакта ток идет от алюминия к меди, вследствие чего алюминиевый проводник может быть сильно разрушен коррозией. Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми всегда должны тщательно защищаться от увлажнения (покрытием лаками и тому подобными способами).

Высокочастотные характеристики алюминия приведены в § 22.

Сплавы алюминия. К алюминиевым сплавам с повышенной по сравнению с чистым алюминием механической прочностью относится альдрей, содержащий 0,3—0,5% Mg, 0,4—0,7% Si и 0,2—0,3% Fe (прочее — Al). Высокие механические свойства альдрей (табл. 64) приобретает после особой обработки (закалки катанки, охлаждения в воде от температуры 510—550° С, волочения и последующей выдержки при температуре порядка 150° С).

В альдрее образуется соединение Mg_2Si, которое придает сплаву высокие механические свойства; при указанной тепловой обработке достигается выделение Mg_2Si из твердого раствора в алюминии и перевод его в тонкодисперсное состояние. Таким образом, альдрей, практически сохраняя легкость чистого алюминия и будучи довольно

близким к нему по проводимости, в то же время по механической прочности приближается к твердотянутой меди (табл. 64).

Таблица 64

Свойства проволоки из альдрея

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	$г/см^3$	2,7
Предел прочности при растяжении	$кГ/мм^2$	35
Относительное удлинение перед разрывом	%	6,5
Температурный коэффициент линейного расширения	$град^{-1}$	$23 \cdot 10^{-6}$
Удельное электросопротивление	$ом \cdot мм^2/м$	0,0317
Температурный коэффициент удельного электросопротивления	$град^{-1}$	0,0036

В настоящее время разработаны алюминиевые сплавы типа альдрей, не требующие тепловой закалки.

Железо

Сталь (железо), как наиболее дешевый и доступный металл, обладающий к тому же высокой механической прочностью, представляет большой интерес для использования в качестве проводникового материала. Однако даже чистое железо имеет значительно более высо-

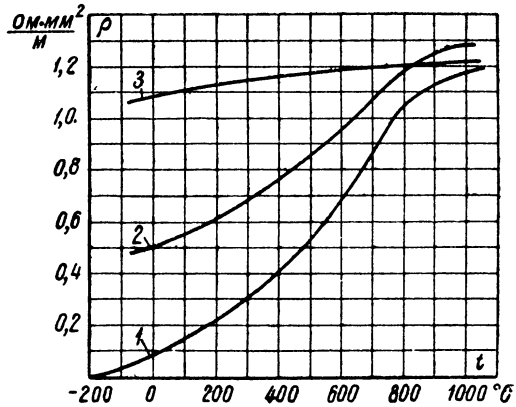


Рис. 149. Зависимость удельного электросопротивления от температуры для чистого железа (кривая *1*), электротехнической стали с содержанием 4% кремния (кривая *2*), ферронихрома Fe — Ni — Cr (кривая *3*).

кое, сравнительно с медью и алюминием, удельное электросопротивление (около 0,1 $ом \cdot мм^2/м$). Удельное электросопротивление стали, т. е. железа с примесью углерода и других элементов, еще выше.

При переменном токе в стали, как ферромагнитном материале, заметно сказывается поверхностный эффект, как это было показано в § 22. Кроме того, при переменном токе в стальных проводниках возникают потери мощности на гистерезис.

В качестве проводникового материала обычно применяется мягкая сталь, содержащая 0,10—0,15% углерода, обладающая пределом прочности при растяжении 70—75 *кГ/мм*^{2}, относительным удлинением при разрыве 5—8% и удельной электропроводностью, в 6—7 раз меньшей, чем у меди.

Обычная сталь характеризуется малой стойкостью по отношению к коррозии: даже при нормальной температуре, особенно в условиях повышенной влажности, она быстро ржавеет; при росте температуры скорость коррозии резко увеличивается. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более устойчивого материала. Чаще всего для этой цели применяют покрытие цинком. Непрерывность слоя оцинковки проверяется опусканием образца провода в 20% раствор медного купороса; при этом на обнаженной стали в местах дефектов оцинковки откладывается медь в виде красных пятен, хорошо заметных на общем сероватом фоне оцинкованной поверхности провода.

Защитные свойства железа приведены на рис. 88.

Железо имеет высокий температурный коэффициент удельного электросопротивления (рис. 149). Поэтому тонкую железную проволоку, помещенную для защиты от окисления в баллон, заполненный водородом или иным химически неактивным газом, можно применять в баретторах, т. е. в приборах, использующих зависимость электросопротивления от тока, нагревающего помещенную в них проволочку, для поддержания постоянства тока при колебаниях напряжения.

Биметалл

В ряде случаев для уменьшения расхода цветных металлов в проводниковых элементах конструкций выгодно применять так называемый проводниковый биметалл (не смешивать с термическим биметаллом). Это — сталь, покрытая снаружи слоем меди, причем оба металла соединены друг с другом прочно и непрерывно по всей поверхности их соприкосновения.

Биметалл имеет механические и электрические свойства, промежуточные между свойствами сплошного медного и сплошного стального проводника того же сечения; прочность биметалла больше, чем меди, но электропроводность его меньше.

Расположение меди в наружном слое, а стали внутри конструкции (рис. 150), а не наоборот, весьма важно; с одной стороны, при переменном токе достигается более высокая электропроводность всего провода в целом; с другой стороны, медь защищает расположенную под ней сталь от коррозии.

Биметаллическая проволока выпускается диаметром от 1 до 4 *мм*; содержание меди должно составлять не менее 50% от полного веса

проволоки. Предел прочности при растяжении должен быть не ниже 55—70 *кГ/мм*^{2} (при расчете на полное сечение провода) в зависимости от диаметра, а относительное удлинение при разрыве — не более 2%. Электросопротивление 1 *км* биметаллической проволоки для постоянного тока в зависимости от диаметра при нормальной температуре (20°С) приведено на рис. 150. Такую проволоку применяют, например, для линий связи.

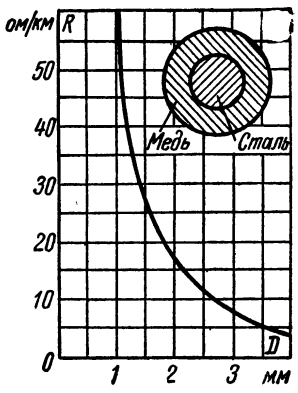


Рис. 150. Зависимость электросопротивления 1 *км* биметаллической проволоки (сталь — медь) от ее наружного диаметра.

§ 24. Металлы и сплавы различного назначения

Основные свойства различных металлов приведены в табл. 57.

Свинец

Свинец — металл сероватого цвета, дающий на свежем срезе сильный металлический блеск, но затем быстро тускнеющий вследствие поверхностного окисления. Свинец имеет крупнокристаллическое строение; если протравить свинец азотной кислотой, его кристаллы становятся видны даже невооруженным глазом. Свинец — мягкий, пластический, мало прочный металл; предел прочности при растяжении — всего лишь 1,6 *кГ/мм*^{2} при относительном удлинении 55%. Он не стоек по отношению к вибрации, в особенности при несколько повышенной температуре. Преимуществом свинца для ряда случаев применения является его высокая антикоррозийная способность; он устойчив к действию воды, серной и соляной кислот (на холоду) и ряда других реагентов; однако азотная и уксусная кислоты, гниющие органические вещества, известь и некоторые другие соединения разрушают свинец.

Свинец и его сплавы в больших количествах применяют в качестве оболочек, защищающих изоляцию кабелей от проникновения в нее влаги. Кроме того, свинец используют для изготовления плавких предохранителей, пластин свинцовых аккумуляторов и т. д. Свинец широко употребляют как материал, сильно поглощающий рентгеновские лучи. Рентгеновские установки с напряжением 200—300 *кв* по нормам безопасности должны иметь свинцовую защиту при толщине слоя соответственно 4—9 *мм*. Слой свинца толщиной 1 *мм* по защитному действию в этих условиях эквивалентен слою стали 11,5 *мм* или слою обычного кирпича толщиной 110 *мм*. Защитные свойства свинца в зависимости от энергии квантов падающего излучения приведены на рис. 88.

В кабельной технике применяют свинец марок С-2 и С-3 (с содержанием примесей не более 0,08% и соответственно 0,14%).

Свинец поставляют в чушках, т. е. продолговатых слитках весом до 50 *кг*.

Сплавы свинца с малыми количествами сурьмы, теллура, кадмия, меди, кальция и олова имеют мелкозернистое строение, повышенную механическую прочность и стойкость к вибрациям; однако коррозийная устойчивость этих сплавов несколько ниже, чем у чистого свинца. Они находят применение в кабельной технике.

Свинец и его соединения ядовиты.

В настоящее время для ряда конструкций кабельных изделий свинцовая оболочка с успехом заменяется более дешевой оболочкой из полихлорвинилового пластиката (см. § 13).

Олово

О л о в о — серебристо-белый металл, обладающий ясно выраженным кристаллическим строением. При изгибе палочки олова слышен треск, вызываемый трением кристаллов друг о друга. Олово — мягкий, тягучий металл, позволяющий получать путем прокатки тонкую фольгу. Предел прочности при растяжении белого олова колеблется от 1,6 до 3,8 *кГ/мм*^{2}.

Кроме обыкновенного б е л о г о о л о в а, кристаллизующегося по тетрагональной системе, существует еще другое видоизменение олова — с е р о е п о р о ш к о о б р а з н о е о л о в о (плотность 5,6 *г/см*^{3}). При сильных морозах на белом олове появляются серые пятна (выделение серого олова), получившие название „оловянной чумы". При нагревании серое олово снова переходит в белое. Если нагреть олово выше 160° С, то оно переходит в третью (ромбическую) модификацию, становится хрупким и при падении разбивается на мелкие куски.

При обыкновенной температуре олово на воздухе не окисляется, вода на него не влияет, а разведенные кислоты действуют очень медленно.

Олово используется в качестве защитных покрытий металлов (л у ж е н и е); оно входит в состав бронз и сплавов для пайки. Тонкая оловянная фольга (6—8 *мкм*), применяемая в производстве некоторых типов бумажных конденсаторов, обычно содержит присадки: до 15% свинца и до 1% сурьмы для облегчения прокатки и улучшения механической прочности. Оловяно-свинцовую фольгу толщиной 2—4 *мкм* применяют в качестве обкладок в слюдяных конденсаторах.

Вольфрам

В о л ь ф р а м — чрезвычайно тяжелый, твердый металл серого цвета. Из всех металлов вольфрам обладает наиболее высокой температурой плавления (см. табл. 57). Зависимость удельного электросопротивления вольфрама от температуры приведена на рис. 151.

Вольфрам получают из руд, встречающихся довольно редко, путем сложной химической переработки; промежуточным продуктом является вольфрамовая кислота H_2WO_4, из которой восстановлением водородом при нагревании до 700° С получается металлический вольфрам в виде мелкого порошка. Из этого порошка при давлении до 2000 *ат*

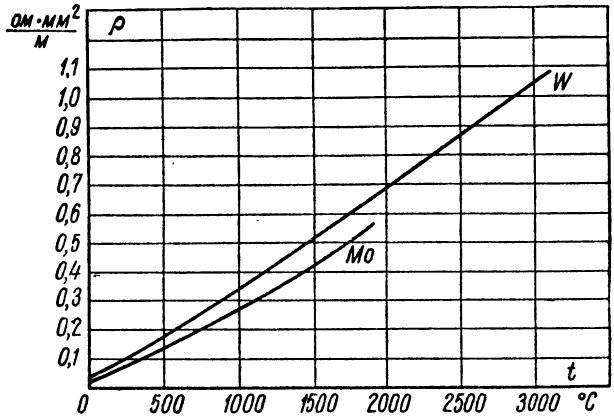


Рис. 151. Зависимость удельного электросопротивления вольфрама и молибдена от температуры.

отпрессовывают стержни, которые в дальнейшем подвергают сложной термической обработке в атмосфере водорода (во избежание окисления), ковке и волочению в проволоку диаметром до 0,01 *мм*, прокатке в листы и т. п.

Для вольфрама характерна слабая механическая связанность между отдельными кристаллами, поэтому при зернистом строении сравни-

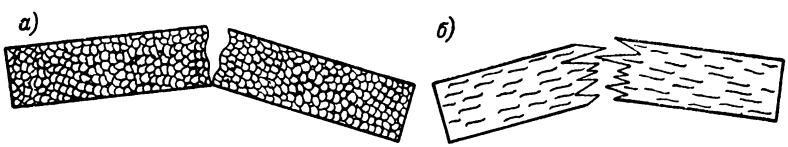


Рис. 152. Схема излома образца вольфрама: *а* — зернистое строение; *б* — волокнистое строение.

тельно толстые вольфрамовые изделия весьма хрупки и легко ломаются. Если же из вольфрама с помощью специальных режимов обработки получить тонкую нить, кристаллы которой имеют вытянутую форму, то излом ее будет весьма затруднен (рис. 152), что и объясняет гибкость тонких вольфрамовых нитей. При уменьшении толщины вольфрамовой проволоки сильно возрастает и ее предел прочности при растяжении (от 50—60 *кГ/мм²* для кованых стержней диаметром 5 *мм*, до 300—400 *кГ/мм²* для тонких нитей).

Вольфрам является одним из важнейших материалов электровакуумной техники. Его применяют для нитей ламп накаливания, а также для электродов, подогревателей, пружин и крючков в электронных лампах, в рентгеновских трубках и т. п. Применение вольфрама для изготовления нитей ламп накаливания было впервые предложено русским изобретателем А. Н. Лодыгиным в 1890 г.

Вследствие тугоплавкости и большой механической прочности при повышенных температурах, вольфрам может работать при высокой температуре накала (более 2000° С), но лишь в глубоком вакууме или в атмосфере инертного газа (азот, аргон и т. п.), так как уже при нагреве до температуры в несколько сот градусов в присутствии кислорода он сильно окисляется (см. рис. 143). Благодаря высокому α_ρ вольфрам иногда используют для баретгеров, которые по сравнению с железными, из-за тугоплавкости вольфрама, обладают повышенной способностью выносить значительные перегрузки током. Вольфрам применяют также для изготовления контактов.

К достоинствам вольфрамовых контактов можно отнести:

а) устойчивость в работе;

б) малый механический износ ввиду высокой твердости материала;

в) способность противостоять действию дуги и отсутствие привариваемости вследствие большой тугоплавкости;

г) малую подверженность эрозии, т. е. электрическому износу с образованием кратеров и наростов в результате местных перегревов и плавления металла.

Недостатками вольфрама как контактного материала являются:

а) трудная обрабатываемость;

б) образование в атмосферных условиях оксидных пленок;

в) необходимость применять большие контактные давления для получения небольших значений сопротивления контактов.

Для контактов на большие значения разрываемой мощности используют металло-керамические материалы. Заготовку прессуют из порошка вольфрама под большим давлением, спекают в атмосфере водорода, получая достаточно прочную, но пористую основу, которую затем пропитывают расплавленным серебром или медью для увеличения электропроводности.

Молибден

Молибден — металл, по внешнему виду, а также по технологии обработки близкий к вольфраму. Для того чтобы отличить молибден от вольфрама, применяют следующий простой способ: испытуемую проволоку нагревают в пламени бензиновой горелки, и если из нее выделяется активный белый дымок, то это — молибден. Молибден широко применяют в электровакуумной технике при менее высоких рабочих температурах, чем вольфрам; накаливаемые детали из молибдена должны работать в вакууме или в восстановительной атмосфере. На рис. 151 показана зависимость удельного электросопротивления молибдена от температуры.

В ряде случаев в электровакуумной технике применяют и некоторые другие тугоплавкие металлы: р е н и й (температура плавления около 3000° С), т а н т а л (2977° С), н и о б и й (1950°), а также специальные сплавы.

Платина

П л а т и н а — благородный металл, практически не соединяющийся с кислородом и весьма стойкий к химическим реагентам. Платина прекрасно поддается механической обработке; вытягивается в очень тонкие нити и ленты.

Платину применяют для изготовления т е р м о п а р на рабочие температуры до 1600° С (в паре со сплавом платинородий, см. рис. 141) и пр. Особо тонкие нити из платины диаметром около 0,001 *мм* для подвесок подвижных систем в электрометрах и других чувствительных приборах получают многократным волочением биметаллической проволоки платина — серебро с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует).

Вследствие малой твердости платина редко применяется для контактов в чистом виде, но служит основой для ряда контактных сплавов. Наиболее распространенными являются сплавы платины с иридием; они не окисляются, имеют высокую твердость, малый механический износ, допускают большую частоту включений, однако дороги и применяются только для ответственных целей.

Серебро

С е р е б р о — благородный металл, стойкий против окисления при нормальной температуре. Серебро отличается от других металлов наименьшим значением удельного электросопротивления (см. табл. 57).

Предел прочности при растяжении для серебряной проволоки составляет около 30 $кГ/см^2$. Такую проволоку используют для изготовления контактов, рассчитанных на небольшой ток. Серебро применяют также для непосредственного нанесения на диэлектрики, в качестве обкладок, в производстве керамических и слюдяных конденсаторов. Для этой цели используют метод вжигания или испарения в вакууме. Серебром покрывают внутренние поверхности волноводов для получения слоя высокой проводимости.

Ртуть

Р т у т ь — единственный металл, находящийся в жидком состоянии при нормальной температуре. При нагреве на воздухе она легко окисляется.

Ртуть применяют в качестве жидкого катода в ртутных выпрямителях, в ртутных лампах и газоразрядных приборах, для ртутных контактов в реле, для ртутных электродов при измерении электрических свойств твердых диэлектриков и в ряде случаев лабораторной практики.

Ртуть и ее соединения весьма ядовиты; очень вредны пары ртути.

Никель

Никель — светло-серый металл, обладающий ферромагнитными свойствами. Его применяют в качестве компонентов ряда магнитных и проводниковых сплавов.

В чистом виде никель используют в вакуумной технике, а также для защитных и декоративных покрытий изделий из железа. Иногда никель применяют для изготовления нагревательных элементов.

Предел прочности при растяжении никелевой проволоки составляет 40 — 45 $кГ/мм^2$ при относительном удлинении 25 — 30%.

Цинк

Цинк — светлый металл, нашедший применение в качестве защитных покрытий, составной части латуней и электродов гальванических элементов. Кроме того, он используется для металлизации бумаги для малогабаритных металлобумажных конденсаторов.

Нанесение металлического слоя на бумагу производят путем испарения цинка в вакууме при температуре порядка 600° С.

Индий

Индий — металл с низкой температурой плавления, использующийся в качестве акцепторной примеси и контактного материала в производстве полупроводниковых триодов и диодов.

Характеристики индия приведены в табл. 57.

Сплавы — платинит, инвар, ковар

Платинит — сплав железа с 42 — 48% никеля, температурный коэффициент линейного расширения которого может быть получен близким к температурным коэффициентам платины и стекол.

Используется в качестве вводов в некоторые виды стеклянных баллонов электровакуумных приборов.

Инвар — сплав железа с примерно 36% никеля; $\alpha_l \approx 10^{-6}$ $град^{-1}$ в диапазоне температур от — 100° С до + 100° С.

Удельное электросопротивление инвара почти в 50 раз больше, чем ρ меди.

Ковар — сплав железа с 29% никеля и 17% кобальта, с очень маленьким температурным коэффициентом линейного расширения и удельным электросопротивлением, примерно в два раза меньшим, чем у инвара.

Сплавы ковар и инвар применяются для вакуумплотной герметизации радиоизделий путем сварки со стеклом, для приготовления пластин конденсаторов переменной емкости, если требуется очень маленький температурный коэффициент емкости.

Припои

Припои представляют собой специальные сплавы, применяемые при пайке. Пайка осуществляется или с целью создания механически прочного (иногда герметичного) шва, или с целью получения электрического контакта с малым переходным сопротивлением. При пайке места соединения и припой нагреваются. Так как припой имеет температуру плавления значительно ниже, чем соединяемый металл (или металлы), то он плавится, в то время как основной металл остается твердым. На границе соприкосновения расплавленного припоя и твердого металла происходят различные физико-химические процессы. Припой смачивает металл, растекается по нему и заполняет зазоры между соединяемыми деталями. При этом припой диффундирует в основной металл, основной металл растворяется в припое, в результате чего образуется промежуточная прослойка, которая после застывания соединяет детали в одно целое.

Припои принято делить на две группы — мягкие и твердые. К мягким относятся припои с температурой плавления до 400° С, к твердым — с температурой плавления выше 500° С. Кроме температуры плавления, припои существенно различаются по механической прочности. Мягкие припои имеют предел прочности при растяжении не выше 5 — 7 $кГ/мм^2$, в то время как твердые — до 50 $кГ/мм^2$.

Выбор припоя производят, сообразуясь с родом паяемого металла (или металлов, если они разнородны), требуемой механической прочностью, коррозийной устойчивостью и стоимостью. При пайке токоведущих частей очень важно учитывать электропроводность припоя. В различных областях радиоэлектроники применяют как мягкие, так и твердые припои. Мягкими припоями являются оловянно-свинцовые сплавы (ПОС).

Существуют также мягкие припои с добавками алюминия, серебра. Еще более легкоплавкими являются припои, в состав которых входят висмут и кадмий. Они применяются там, где требуется пониженная температура пайки. Механическая прочность их очень незначительна; висмутовые припои обладают большой хрупкостью. Наиболее распространенными твердыми припоями являются медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (ПСр) припои.

Обобщенные характеристики различных припоев приведены в табл. 65.

Флюсы

Для получения надежной пайки используют вспомогательные вещества, называемые флюсами, которые должны:

Таблица 65

Состав и свойства некоторых припоев

Тип	Марка	Основные компоненты	Свойства					Материал, спаиваемый данным припоем
			плотность, $г/см^3$	предел прочности при растяжении, $кГ/мм^2$	температура плавления, °С	$\alpha_l \cdot 10^6$, $град^{-1}$	электропроводность по отношению к меди, %	
Припои оловянно-свинцовые	От ПОС-18 до ПОС-90	Sn — от 18 до 90% Sb — от 0,15 до 2,5% Pb — остальное	7,6 — 10,2	2,8 — 4,3	190 — 277	26 — 27	9 — 13	Медь, сплавы меди, никель, серебро, оцинкованное железо
Припои оловянно-свинцово-кадмиевые	ПОСК-47, ПОСК-50	Sn — от 47 до 50% Pb — от 32 до 36% Cd — от 17 до 18%	—	—	145—180	—	—	Медь, медные сплавы, серебро, нанесенное методом вжигания в керамику
Припои оловянно-свинцово-серебряно-кадмиевые	ПСрК	Sn — 30% Pb — 63% Cd — 5% Ag — 2%	—	—	225	—	—	То же
Сплав Вуда	—	Sn — 12,5% Pb — 26% Cd — 11,5% Bi — 50%	—	—	60,5	—	—	Применяется там, где необходима особо низкая температура пайки
Припои оловянно-кадмиево-цинковые	АВИА	Sn — 40% Cd — 20% Zn — 25% Al — 15%	—	—	200—250	—	—	Алюминий и его сплавы
Припои медно-цинковые	ПМЦ-36 ПМЦ-54	Cu — 36 — 54% Zn — остальное	7,7—8,3	~ 22	825—860	—	—	Медь, медные сплавы, сталь
Припои медно-серебряно-цинковые	От ПСр-25 до ПСр-70	Cu —26—40% Ag —25—70% Zn — 4—35%	8,9—9,8	28—35	720—765	—	—	Медь и ее сплавы, серебро, платина, вольфрам, сталь

1) растворять и удалять окислы и загрязнения с поверхности спаиваемых металлов;

2) защищать в процессе пайки поверхность металла, а также расплавленный припой от окисления;

3) уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя;

4) улучшать растекаемость припоя и смачиваемость им соединяемых поверхностей.

По действию, оказываемому на металл, подвергающийся пайке, флюсы делят на несколько групп.

1. Активные, или кислотные флюсы. Они приготовляются на основе активных веществ — соляной кислоты, хлористых и фтористых металлов и т. д. Эти флюсы интенсивно растворяют окисные пленки на поверхности металла, благодаря чему обеспечивается хорошая адгезия, а следовательно, и высокая механическая прочность соединения. Остаток флюса после пайки вызывает интенсивную коррозию соединения и основного металла. Применяются эти флюсы только в том случае, когда возможна тщательная промывка и полное удаление остатков флюса.

При монтажной пайке электрорадиоприборов применение активных флюсов категорически запрещено.

2. Бескислотные флюсы. Так называют канифоль и флюсы, приготовляемые на ее основе с добавлением неактивных веществ (спирта, глицерина).

3. Активированные флюсы. Так называют флюсы, приготовляемые на основе канифоли с добавкой активизаторов — небольших количеств солянокислого или фосфорнокислого анилина, салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина и т. п. Высокая активность некоторых активированных флюсов позволяет производить пайку без предварительного удаления окислов после обезжиривания. Активированными флюсами являются флюс с анилином, флюсы ЛТИ.

4. Антикоррозийные флюсы. Антикоррозийными называют флюсы на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также флюсы на основе органических кислот. Остатки этих флюсов не вызывают коррозии (флюс ВТС).

§ 25. Сплавы высокого электросопротивления

Сплавы высокого сопротивления применяются для электроизмерительных приборов, образцовых сопротивлений, реостатов и электронагревательных приборов. Во всех этих случаях от проводника требуется возможно большее удельное электросопротивление. При использовании проводниковых сплавов для электроизмерительных приборов и образцовых сопротивлений от них требуется также возможно меньшее значение α_ρ и малая термо-э. д. с. относительно меди. Сплавы для электронагревательных приборов должны длительно работать на воздухе при температурах порядка 1000° С.

Таблица 66

Состав и свойства основных сплавов высокого сопротивления

Наименование сплава	Состав, %					Свойства						Примечание
	Cu	Mn	Ni	Cr	Al	Fe	Плотность, $г/см^3$	Удельное электрическое сопротивление, $ом \cdot мм^2/м$	α_ρ, $град^{-1}$	Термо-э. д. с. относительно меди, $мкв/град$	Предельно допустимая рабочая температура, °С	Предел прочности при растяжении, $кГ/мм^2$	Относительное удлинение при разрыве, %	
Манганин	86	12	2	—	—	—	8,4	0,42—0,48	(5—30) 10^{-6}	1—2	100—200	45—60	15—30	
Константан	60	—	40	—	—	—	8,9	0,48—0,52	—(5—25) 10^{-6}	40—50	450—500	40—50	20—40	
Хромо-никелевые сплавы:														Сплавы типа „нихром"
Х15Н60	—	1,5	55—61	15—18	—	Остальное	8,2—8,3	1,0—1,2	(1—2) 10^{-4}	—	1000	65—70	25—30	
Х20Н80	—	1,5	75—78	20—23	—	Остальное	8,4—8,5	1,0—1,1	(1—2) 10^{-4}	—	1100			
Хромо-алюминиевые сплавы:														Сплавы типа „фехраль" и „хромаль"
Х13Ю4	—	0,7	0,6	12—15	3,5—5,5	Остальное	7,1—7,5	1,2—1,35	(1—1,2) 10^{-4}	—	850	~70	~20	
Х25Ю5	—	0,7	0,6	23—27	4,5—6,5	Остальное	6,9—7,3	1,3—1,5	6,5· 10^{-5}	—	1200	~80	10—15	

Кроме того, необходимо, чтобы сплавы позволяли изготовлять из них гибкую проволоку (в том числе для электроизмерительных приборов) диаметром порядка сотых долей миллиметра. Сплавы, используемые для приборов массового потребления — реостатов, электроплиток, паяльников и т. д., должны быть дешевыми.

Из большого числа сплавов, предлагавшихся для указанных целей, в настоящее время наибольшее распространение в практике получили сплавы на медной основе: манганин и константан и сплавы на хромо-никелевой и железо-хромовой основе с добавлением алюминия.

Манганин

Манганин — основной сплав для электроизмерительных приборов и образцовых сопротивлений. Манганин — сплав на медной основе; состав и свойства его приведены в табл. 66. Отличается характерным желтоватым оттенком. Хорошо вытягивается в тонкую проволоку до диаметра 0,02 *мм*. Из манганина изготовляется также лента толщиной 0,01—1 *мм* и шириной 10—300 *мм*.

Для получения малого α_ρ и высокой стабильности сопротивления во времени манганин необ-

ходимо подвергать специальной термической обработке (отжигу при 350—550° С в вакууме с последующим медленным охлаждением и дополнительной длительной выдержкой при комнатной температуре).

Константан

Константан — сплав меди и никеля (табл. 66). Содержание никеля в сплаве примерно отвечает максимуму ρ и минимуму α_ρ для сплавов Cu—Ni (см. рис. 137). Хорошо поддается обработке; константан можно протягивать в проволоку и прокатывать в ленту тех же размеров, что и манганин. Значение α_ρ константана близко к нулю и обычно имеет отрицательный знак.

Константан применяют для изготовления реостатов и электронагревательных элементов в тех случаях, когда рабочая температура не превышает 400—450° С.

При нагреве до достаточно высокой температуры на поверхности константана образуется пленка окислов, которая обладает электроизоляционными свойствами (оксидная изоляция). Покрытую такой изоляцией константановую проволоку можно мотать плотно, виток к витку, без особой изоляции между витками, если только напряжение между соседними витками не превосходит 1 *в*. Таким образом изготовляют, например, реостаты. Для оксидировки константановой проволоки, дающей достаточно гибкую и прочную оксидную пленку требуется быстрый (не более 3 *сек*) нагрев проволоки до температуры 900° С с последующим охлаждением на воздухе.

Константан в паре с медью или железом дает большую термоэлектродвижущую силу (см. рис. 141). Это является недостатком при использовании константановых сопротивлений в измерительных схемах; за счет разности температур в местах контакта константановых проводников с медными возникают термоэлектродвижущие силы, которые могут явиться источником ошибок, особенно при нулевых измерениях в мостовых и потенциометрических схемах.

Константан с успехом применяют для изготовления термопар, служащих для целей измерения температуры, если последняя не превышает нескольких сотен градусов.

Нихромы

Хромо-никелевые сплавы (нихромы) используются для изготовления нагревательных элементов, электрических печей, плиток, паяльников и т. д. Из этих сплавов изготовляют проволоку диаметром от 0,02 *мм* и выше и ленту сечением от 0,1 × 1,0 *мм* и выше. Зависимость сопротивления от температуры для хромо-никелевого сплава показана на рис. 149.

Высокую жаростойкость нихрома (см. табл. 66) можно объяснить значительной стойкостью этого сплава к окислению на воздухе при высоких температурах.

Металлы (кроме платины и некоторых других, практически не окисляющихся) обладают способностью к химическому соединению с кислородом с образованием соответствующих окислов; скорость окисления у различных металлов различна; при повышении температуры скорость окисления возрастает. Скорость окисления удобно оценивать по изменению веса металла (по количеству кислорода, поглощенному металлом).

На рис. 143 показано количество кислорода, поглощаемого некоторыми металлами (в граммах на 1 $м^2$ поверхности металла за 1 *час*), в зависимости от температуры нагрева при свободном доступе воздуха. В таких условиях чрезвычайно быстро окисляются железо и вольфрам. При повышенных температурах наблюдается также заметное возрастание скорости окисления меди. В тех же условиях хром и никель показывают значительную устойчивость против окисления даже при высоких температурах.

Большое влияние на скорость окисления металлов оказывают свойства образующегося окисла. Если окисел летуч, то он удаляется с поверхности металла и не может защитить оставшийся металл от дальнейшего окисления. Так, окислы вольфрама и молибдена легко улетучиваются, а потому эти металлы не могут работать в накаленном состоянии при доступе кислорода. Если же окисел металла нелетуч, то он при окислении образует слой на поверхности металла. Здесь опять-таки приходится различать два случая. Если объем окисла больше объема металла, из которого он образовался, то слой окисла получается сплошным и диффузия кислорода сквозь него затруднена, т. е. он будет предохранять металл от дальнейшего окисления. Если же объем окисла меньше объема металла, из которого он образовался, то слой окисла не будет сплошным и не может преградить воздуху доступ к глубинным слоям металла.

Объемный коэффициент окисления (отношение объема окисла к исходному объему металла) легко может быть получен из формулы:

$$K=\frac{M\gamma_м}{nA\gamma_о}, \qquad (159)$$

где: A — атомный вес металла;

n — число его атомов, входящих в молекулу окисла;

M — молекулярный вес окисла;

$\gamma_м$, $\gamma_о$ — удельные веса металла и соответственно окисла.

Сделаем расчет по формуле (159), например, для случая окисления алюминия. Имеем для алюминия: $A=26{,}97$; $\gamma_м=2{,}7$ $г/см^3$; для окиси алюминия Al_2O_3: $M=101$, 91; $n=2$; $\gamma_о=3{,}91$ $г/см^3$. Формула (159) дает $K=1{,}31$. Так как $K>1$, можно предположить, что даже тонкий слой Al_2O_3 на поверхности алюминия будет предохранять его от дальнейшего окисления. Это полностью подтверждается на опыте (вспомним сказанное выше о коррозийной стойкости алюминия и об его оксидной изоляции). Для никеля и хрома также $K>1$.

В свете изложенного становится понятной высокая стойкость хромо-никелевых сплавов к окислению — на их поверхности при нагреве образуется сплошной защитный слой из весьма устойчивых окислов — окиси хрома Cr_2O_3 и закиси никеля NiO. Очевидно, что сплавы с содержанием железа менее стойки к окислению, чем не содержащие железа (при равном содержании хрома).

Третьим чрезвычайно существенным моментом, объясняющим стойкость хромо-никелевых сплавов при высокой температуре на воздухе, являются близкие значения температурных коэффициентов линейного расширения сплавов и их оксидных пленок. Поэтому последние не растрескиваются и не отскакивают от проволоки при ее нагревании и расширении. Однако, хотя температурные коэффициенты расширения сплава и окислов хрома и никеля близки, но не одинаковы. Поэтому при резких изменениях температуры может происходить растрескивание слоя окислов; при последующем нагреве кислород будет проникать в трещины и производить дополнительное окисление сплава. Становится понятным, почему при многократном кратковременном включении электронагревательного элемента из хромо-никелевого сплава он может перегореть скорее, чем в случае непрерывного режима нагрева (температура нагрева одна и та же в обоих сравниваемых случаях, а срок службы может отличаться в 20—30 раз).

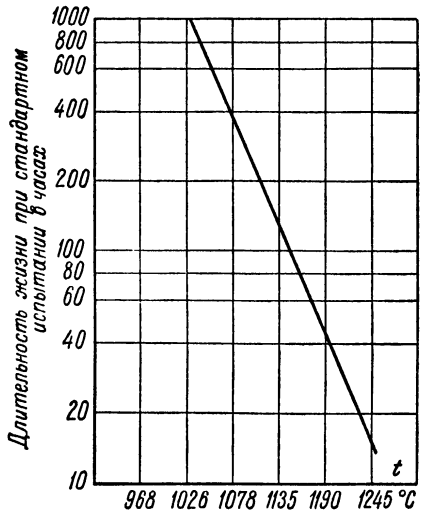


Рис. 153. Зависимость длительности жизни хромо-никелевого сплава от температуры.

Длительность жизни проволоки из жаростойких сплавов в большой степени зависит от колебаний величин диаметра по длине проволоки и от однородности состава; наличие мест с пониженным диаметром и местных изменений состава резко снижают срок службы электронагревательного прибора.

Увеличение срока службы нагревательных элементов может быть достигнуто заделкой спиралей в твердую инертную среду типа глины-шамота, предохраняющую их от механических воздействий и затрудняющую доступ кислорода.

Длительность жизни хромо-никелевого сплава характеризуется кривой рис. 153.

Хромо-алюминиевые сплавы („фехраль", „хромаль") являются более дешевыми сплавами, применяющимися для мощных электронагре-

вательных устройств и промышленных печей. По сравнению с хромоникелевыми сплавами эти сплавы более тверды и хрупки; они с трудом вытягиваются в проволоки и ленты.

На жаростойкие сплавы имеются ГОСТ 9239-59, 2238-58 и 2615-54.

§ 26. Непроволочные линейные сопротивления

В качестве проводящих материалов непроволочных линейных сопротивлений могут быть использованы природный графит, сажа, пиролитический углерод, бороуглеродистые пленки, а также высокоомные сплавы металлов.

Природный графит представляет собой одну из модификаций чистого углерода, структура которого показана на рис. 154. Каждый атом связан с тремя ближайшими атомами в этой же плоскости сильной гомеополярной связью, в то время как между слоями действуют сравнительно слабые ван-дер-ваальсовы силы. Такая структура создает анизотропию и в физических свойствах кристаллов.

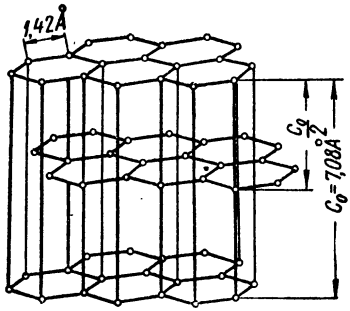


Рис. 154. Структура графита.

Для монокристалла графита электропроводность в направлении слоев имеет металлический характер, удельное электросопротивление невелико и обладает положительным температурным коэффициентом. Величина сопротивления в направлении, перпендикулярном плоскостям, в несколько тысяч раз больше и имеет свойственный полупроводникам большой отрицательный температурный коэффициент.

Механическая прочность кристаллов вдоль плоскостей велика, в то время как в поперечном направлении кристаллы сравнительно легко расщепляются. При окислении в нормальных условиях связь между атомами в слое не нарушается. Однако молекулы кислорода или воды легко проникают в межплоскостные пространства и увеличивают расстояние между ними. В результате такого „набухания" графита происходит увеличение электросопротивления. Заметное окисление с образованием CO_2 наступает при температурах более 180° С.

Основные свойства графита приведены в табл. 67.

Сажи являются мелкодисперсными разновидностями углерода. Будучи введены в лаки, они проявляют склонность к структурообразованиям.

Пиролитический углерод получают путем термического разложения без доступа кислорода (пиролиз) газообразных углеводородов (метана, бензина, гептана) в камере, где находятся керамические

Таблица 67

Основные свойства графита и пиролитического углерода

Характеристика	Единица измерения	Поликристаллический графит	Монокристалл графита		Пиролитический углерод
			вдоль базисных плоскостей	поперек базисных плоскостей	
Плотность	*г/см*³	2,26	2,24		2,07
Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$	*град*$^{-1}$	7,5	6,6	26	6,5 ÷ 7
Удельное электросопротивление	*ом·мм*²*/м*	8	0,4	100	10 ÷ 50
Температурный коэффициент удельного электросопротивления	*град*$^{-1}$	$-1 \cdot 10^{-3}$	$+9 \cdot 10^{-4}$	$-4 \cdot 10^{-2}$	$-2 \cdot 10^{-4}$

или стеклянные основания будущих сопротивлений. Реакция пиролиза имеет вид:

$$C_x H_y = x \cdot C + \frac{y}{2} H_2.$$

Особенностью структуры пиролитического углерода является отсутствие строгой периодичности в расположении слоев при сохранении их параллельности. Расстояние между слоями несколько больше, чем у графита, и достигает 3,7 Å (в зависимости от величины кристаллов). Расстояние между атомами в слое равно 1,39 Å.

Свойства сравнительно толстой пленки пиролитического углерода (более 10^{-6} *см*) приведены в табл. 67.

С уменьшением толщины пленки пропорциональность между проводимостью пленок и количеством осажденного углерода нарушается, а температурный коэффициент удельного электросопротивления возрастает. Причиной этого является ухудшение ориентации кристаллитов в пленке и нарушение ее цельности.

Боруглеродистые пленки с очень маленьким температурным коэффициентом удельного электросопротивления могут быть получены пиролизом борорганических соединений, например $(C_3H_7)_3B$ или $(C_4H_9)_3B$.

В табл. 68 приведены электрические характеристики боруглеродистых пленок и пленок сплавов металлов, используемых для изготовления сопротивлений (МЛТ).

Непроволочные линейные сопротивления подразделяют на постоянные и переменные. Постоянные сопротивления делятся на поверхностные и объемные. В СССР основное распространение получили поверхностные сопротивления. Поверхностные сопротивления в свою очередь делятся на поверхностные тонкопленочные и поверхностные композиционные, в которых проводящая фаза заключена в связующем лаке.

Таблица 69

Основные параметры непроволочных сопротивлений

Тип	Наименование сопротивления	Номинальная величина $R_н$	Номинальная мощность $P_н$, *вт*	Предельное постоянное напряжение $U_{пред}$, *в*	$\alpha_R \cdot 10^3$, *град* $^{-1}$	Максимальная рабочая температура, °С	Уровень шума, *мкв/в*	Коэффициент напряжения, %	Коэффициент нагрузки, %	Коэффициент сохранности за 6 месяцев $\Delta R/R_{ном}$, %
1. Постоянные непроволочные сопротивления										
ВС	Непроволочное углеродистое	20 *ом* — 10 *Мом*	0,25 — 100	До 15000*	От —0,6 до —1,2	40	⩽ 5	± 2	От + 2 до — 6	3
МЛТ	Металлизированное лакированное теплостойкое	100 *ом* — 10 *Мом*	0,5 — 10	До 1800*	± 1,0	70	⩽ 5	± 3	± 6	3
УЛИ	Углеродистое лакированное измерительное	1 *ом* — 1 *Мом*	0,25 — 1,0	750	От — 0,3 до — 1	60	2 — 3	2	5	0,5
БЛП	Боруглеродистое лакированное прецизионное	20 *ом* — 100 *ком*	0,25 — 0,5	400	От —0,1 до —0,2	50	⩽ 1	—	—	0,5
МЛП	Металлизированное лакированное прецизионное	100 *ком* — 5 *Мом*	0,5	400	± (0,1 — 0,2)	50	⩽ 1	—	—	0,5
УЛМ	Углеродистое лакированное малогабаритное	20 *ом* — 1 *Мом*	0,125	100	— 1,2	40	⩽ 5	± 2	От + 2 до — 6	3
КВМ	Композиционное вакуумное мегомное	10^7 *ом* — 10^{12} *ом*	0,5	30	2,5	60	—	± 10	—	8
КЛМ	Композиционное лакированное мегомное	10^7 *ом* — 10^{12} *ом*	0,5	600	2,5	60	—	± 15	—	8
КЛВ	Композиционное лакированное высоковольтное	47 *Мом* — 1000 *Мом*	0,5 — 5,0	До 35000	2,5	60	—	± 15	—	8
УНУ	Углеродистое нелакированное ультравысокочастотное	до 100 *ом*	0,1 — 100	До 12000	— 0,5	20	—	—	—	3
ТВО	Теплостойкое влагостойкое объемное	10 *ом* — 100 *ком*	0,25 — 60	До 10000	— 2,0	80	⩽ 10	2 — 3	10 — 15	3
2. Переменные непроволочные сопротивления										
СПО	Сопротивление переменное объемное	51 *ом* — 5,1 *Мом*	0,15 — 2,0	250 — 600	От —0,8 до —1,2	80	⩽ 10	—	—	3
СП	Сопротивление переменное	470 *ом* — 4,7 *Мом*	0,5 — 2,0	300 — 500	—	70	⩽ 10	—	—	5

* Предельные напряжения приведены для сопротивлений с высшим значением номинальной мощности.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

§ 27. Общие сведения о полупроводниках

Удельное электросопротивление металлических проводников при температуре 20° С находится в пределах от 10^{-6} до 10^{-3} *ом · см*, т. е. охватывает около трех порядков величин; удельное электросопротивление реальных (технических) диэлектриков занимает диапазон от 10^{9} до 10^{19} *ом · см*, т. е. не менее 10 порядков величин. Огромный промежуточный диапазон значений удельного электросопротивления от 10^{-4} до 10^{10} *ом · см*, т. е. до 14 порядков, частично перекрывающий края областей проводников и диэлектриков, принадлежит полупроводниковым веществам с электронной проводимостью.

Как указывалось в § 3, электропроводность полупроводников в очень сильной мере зависит от внешних энергетических воздействий, а также от различных примесей, иногда даже в ничтожных количествах содержащихся в теле основного полупроводника.

Управляемость свойств полупроводников положена в основу принципа действия термосопротивлений (термисторов), фотосопротивлений, нелинейных сопротивлений (варисторов) и т. д.

Наличие у полупроводников двух типов проводимости — электронной" (*n*) и „дырочной" (*p*)* позволяет изготовлять полупроводниковые детали с $p-n$-переходом. При существовании в полупроводнике $p-n$-перехода возникает запорный слой, которым обусловливается выпрямительный эффект для переменного тока. Наличие двух или более взаимно связанных переходов позволяет получать управляемые системы — кристаллические триоды и тетроды.

На использовании возможностей $p-n$-переходов основаны важнейшие применения полупроводников в радиотехнике. К ним относятся различные типы как мощных, так и маломощных выпрямителей, высокочастотных детекторов, кристаллических усилителей и генераторов.

Полупроводниковые системы могут быть с успехом использованы для преобразования различных видов энергии в энергию электрического тока с такими значениями коэффициента преобразования, которые делают их сравнимыми с преобразователями других типов, а иногда и превосходящими их. Примерами полупроводниковых преобразователей могут служить термобатареи, имеющие к. п. д. около 8%, и „солнечные батареи" с к. п. д. порядка 11%.

При помощи полупроводников можно осуществить также охлаждение на несколько десятков градусов.

Кроме указанных основных применений полупроводников, с их помощью может быть решено еще очень большое число различных

---

* *n* — negativus — отрицательный;
p — positivus — положительный.

задач; например, они могут служить нагревательными элементами (силитовые стержни), возбуждать катодное пятно в игнитронных выпрямителях (игнитронные поджигатели), поглощать малые и большие мощности в волноводах (волноводные поглотители), являться датчиками давлений и т. д.

Применяемые в практике полупроводниковые материалы могут быть подразделены на полупроводниковые элементы, полупроводниковые химические соединения и сплавы, полупроводниковые комплексы (керамические полупроводники), а также стеклообразные и жидкие полупроводники.

Полупроводниковых элементов известно десять; они перечислены в табл. 70.

Таблица 70

Элементы — электронные полупроводники

Элемент	Группа таблицы Д. И. Менделеева	Ширина запрещенной зоны, *эв*	Элемент	Группа таблицы Д. И. Менделеева	Ширина запрещенной зоны *эв*
Бор	III	1,1			
Углерод . .	IV	5,2	Сера	VI	2,5
Кремний . .	IV	1,12	Селен	VI	1,7
Германий . .	IV	0,72	Теллур . . .	VI	0,36
Фосфор . . .	V	1,5	Иод	VII	1,25
Мышьяк . .	V	1,2			

Примечание. Иногда к полупроводниковым элементам относят сурьму и олово, которые в некоторых модификациях обладают свойствами полупроводников. Углерод (в виде алмаза) и серу в ряде случаев практики относят к диэлектрикам.

К наиболее известным полупроводниковым химическим соединениям относятся многие окислы, сульфиды, селениды, теллуриды, карбиды, соединения $A^{III}B^{V}$ (InSb и т. д.) и др. К полупроводниковым сплавам можно отнести также сплавы металлов, названные Н. С. Курнаковым дальтонидами и бертоллидами (см. § 22).

К керамическим полупроводникам относятся материалы с полупроводниковой фазой из карбида кремния, карбида бора или углерода, сцепленных керамической связкой.

Развитие исследования полупроводников и их технического применения в СССР можно подразделить на три основных периода:

I — период отдельных открытий и исследований (до 1930 г.);

II — период создания науки о полупроводниках и технического применения полупроводниковых выпрямителей и фотоэлементов (1930—1945 гг.);

III — период широкого развития исследований и массового практического применения полупроводников (с 1945 г.).

Полупроводниковые приборы обладают целым рядом преимуществ. К ним относятся:

1) большой срок службы (при электронной проводимости отсутствует старение материала);

2) малые габариты и вес;

3) простота и надежность конструкции, большая механическая прочность (не боятся тряски и ударов);

4) полупроводниковые заменители электронных ламп не имеют цепей накала, потребляют незначительную мощность и обладают малой инерционностью;

5) при освоении в массовом производстве они экономически целесообразны.

Советская наука и техника полупроводников развивалась собственным путем, обогащая мировую науку своими достижениями и успехами и в то же время используя все прогрессивное, что давала зарубежная наука и техника, путем творческого освоения практических результатов иностранных работ.

§ 28. Электропроводность полупроводников

Общие представления зонной теории твердого тела, приведенные в § 3, указывают, что для полупроводников характерно наличие запрещенной зоны в энергетической диаграмме (см. рис. 20).

Ширина запрещенной зоны полупроводниковых элементов в электроно-вольтах приведена в табл. 70. Для наиболее широко используе-

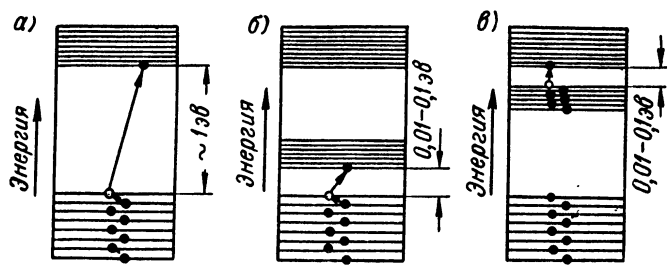


Рис. 157. Влияние примесей на энергетическую диаграмму полупроводников.

● — электрон; ○ — дырка; *а* — основной полупроводник; *б* — полупроводник с акцепторной примесью типа *р*. Электропроводность— дырочная; *в* — полупроводник с донорной примесью типа *п*. Электропроводность — электронная.

мых полупроводников она составляет величину порядка 1—2 *эв*. При отсутствии в полупроводнике свободных электронов ($T=0$) приложенная к нему разность электрических потенциалов не вызовет тока. Если извне будет подведена энергия, достаточная для переброса электрона через запрещенную зону (рис. 157, *а*), то став свободным, электрон сможет перемещаться и под действием электрического поля, создавая электронную электропроводность полупроводника.

В зоне валентных связей (заполненной), откуда ушел электрон, образовалась „электронная дырка", а потому в полупроводнике начнется и другое движение электронов, заполняющих образовавшуюся дырку, причем под воздействием электрического поля дырка будет двигаться в направлении поля, как эквивалентный положительный заряд. Ввиду того, что перемещение дырок осуществляется с большей инерционностью, чем движение свободных электронов при равном их количестве, полупроводники, как правило, показывают электронный характер собственной электропроводности. Собственную электропроводность обозначают буквой *i*. *

Наиболее ярко два механизма электропроводности проявляются у полупроводников под влиянием примесей, которые могут создавать значительное преобладание одного из этих механизмов над другим.

Под примесями следует понимать не только включения в основной полупроводник инородных атомов, но также избыток одного из атомов, образующих химические соединения, являющиеся полупроводниками (оксиды, сульфиды, карбиды), и всевозможные дефекты кристаллической решетки. Влияние примесей на энергетическую диаграмму полупроводника показано на рис. 157, *б* и *в*. Как видно из рисунка, примеси могут быть двух типов: „акцепторы" и „доноры".

Акцепторные примеси создают в полупроводнике дополнительные свободные энергетические уровни, на которые могут переходить электроны из заполненной зоны, образуя там дырки. Такой полупроводник обладает электропроводностью типа *p*.

Донорные примеси поставляют электроны в зону свободных энергетических уровней основного полупроводника, создавая в веществе электропроводность типа *n*.

Как видно из рис. 157, примесная электропроводность полупроводников для своего появления требует меньших энергетических воздействий, вследствие чего она обнаруживается при более низких температурах, чем собственная электропроводность полупроводника.

Рассмотрев энергетическую сторону явлений, перейдем теперь к пространственным структурам и реальным примесям, определяющим тот или иной тип электропроводности. При этом могут встретиться два случая: 1) основной полупроводник представляет собой элемент; 2) основной полупроводник является химическим соединением.

Первый случай можно рассмотреть на кристалле германия или кремния, в которых атомы удерживаются за счет ковалентных, или парно-электронных связей с четырьмя другими подобными себе атомами (структура алмаза — см. рис. 13). На рис. 158, *а* показана кристаллическая решетка кремния, не содержащая инородных примесей. На рис. 158, *б* изображена решетка кремния с примесью элемента третьей группы — бора, имеющего на внешней орбите три

* *i* — *intrinsic* — собственный.

валентных электрона. Такая примесь в решетке кремния создает дырку, и в случае приложения электрического поля, как показано на рисунке, от левого атома кремния будет взят электрон, который, в свою очередь, захватит электрон от следующего атома, т. е. дырка начнет передвигаться справа налево. Полупроводник с таким механизмом проводимости называется полупроводником типа *p*.

На рис. 158, *в* приведена кристаллическая решетка кремния с примесью мышьяка — элемента пятой группы, у которого на внешней

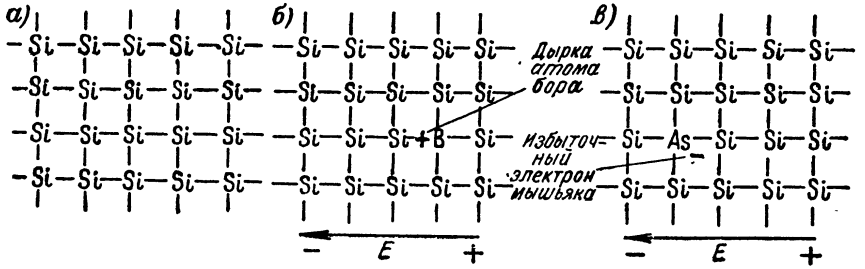


Рис. 158. Кристаллическая решетка кремния без примесей, с акцепторной примесью бора и донорной примесью мышьяка.

орбите расположено пять электронов. Попав в решетку кремния и связав четыре из своих электронов, такая примесь дает избыточный свободный электрон, который под воздействием электрического поля станет перемещаться слева направо. Полупроводник с таким механизмом проводимости называется полупроводником типа *n*.

В случае химических соединений примеси не следует понимать буквально, так как их роль может играть избыток металлических или неметаллических атомов по отношению к нормальной формуле данного соединения. Так, например, избыточные атомы кислорода, попавшие в закись меди Cu_2O, создают дополнительные акцепторные уровни, в результате чего получается полупроводник типа *p*. При избытке атомов меди образуются донорные металлические уровни, такой полупроводник может быть отнесен к типу *n*.

Два типа проводимости полупроводников представляют собой реальные физические процессы, в чем легко убедиться при помощи опытов.

На рис. 159, *а* иллюстрируется сущность метода определения типа электропроводности полупроводника по изменению знака поперечной э. д. с. эффекта Холла. Если поместить полупроводниковую пластинку во внешнее поперечное магнитное поле *H* и приложить в направлении длины ее разность потенциалов, создающую электрическое поле *E*, то вследствие смещения носителей тока к одной из граней пластинки возникает поперечная э. д. с., измеряемая вольтметром *V*. (Направление смещения зарядов определяется по правилу трех пальцев левой руки, относящемуся к техническому направлению тока). Из рис. 159, *а* видно, что при изменении механизма электропровод-

ности меняется и направление отклонения стрелки вольтметра, по которому и судят о типе (*p* или *n*) испытуемого полупроводника.

Другой метод состоит в нагревании одного конца испытуемого полупроводника, как показано на рис. 159, *б*. При этом, если испытывается полупроводник типа *p*, то в нагретом конце, за счет затраты внешней тепловой энергии, большее число электронов будет переброшено из заполненной зоны на акцепторные уровни по сравнению с холодным концом. Начнется диффузия дырок из горячего

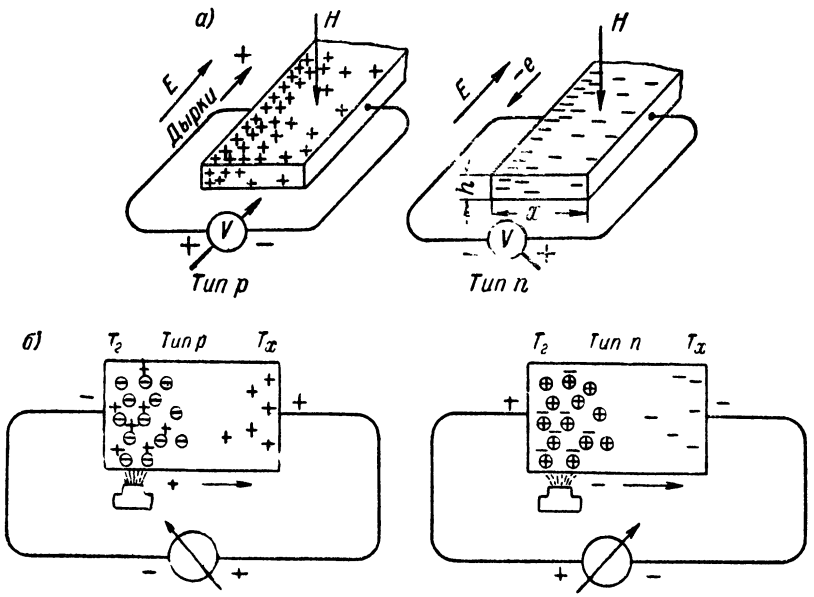


Рис. 159. Метод определения типа электропроводности полупроводников: *а* — при помощи эффекта Холла; *б* — при помощи нагревания одного из концов испытуемого полупроводника.

конца в холодный, и он окажется заряженным отрицательно по отношению к холодному концу. Отсюда следует, что холодный конец полупроводника типа *p* заряжается положительно.

В случае испытания полупроводника типа *n* в горячем конце в результате затраты внешней тепловой энергии будет освобождено большее число электронов, чем в холодном конце, и поэтому они начнут посредством диффузии распространяться к холодному концу, где их в свободном состоянии было меньше. Вследствие ухода электронов горячий конец зарядится положительно, а холодный — отрицательно.

Для полупроводников, также как для проводников и диэлектриков, справедливо выражение

$$\gamma = en_0 v_1. \qquad (162)$$

Входящие в это выражение концентрация носителей тока $n_0[см^{-3}]$ и их подвижность v_1 $[см^2/сек \cdot в]$ являются характеристиками полупроводника. Путем измерения электропроводности полупроводников можно определить только произведение этих двух величин. Для их разделения можно воспользоваться эффектом Холла. Смещение носителей тока в поперечном направлении в полупроводнике прекратится, когда лоренцова сила уравновесится силой возникшего поперечного электрического поля сместившихся зарядов:

$$ev_{ср}H = eE_x; \tag{163}$$

$$E_x x = U_x; \tag{164}$$

$$S = xh. \tag{165}$$

Используя выражения (139), (163), (164) и (165), получим:

$$U_x = \frac{1}{en_0} \cdot \frac{IH}{h} = X \frac{IH}{h}. \tag{166}$$

Поперечная э. д. с. (U_x), ток I, напряженность магнитного поля H и толщина полупроводниковой пластинки h могут быть легко измерены, что позволяет определить численное значение постоянной Холла X.

Более точное значение постоянной Холла для полупроводников с атомной решеткой будет равно:

$$X = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{1}{en_0} \; [см^3/к]. \tag{167}$$

С помощью уравнений (162) и (167) можно определять численные значения концентрации и подвижности зарядов в полупроводниках.

Как указывалось выше, электропроводность полупроводников при повышении температуры возрастает. Рост электропроводности полупроводников практически обусловлен возрастанием вместе с температурой концентрации носителей тока, так как подвижность зарядов может или слабо

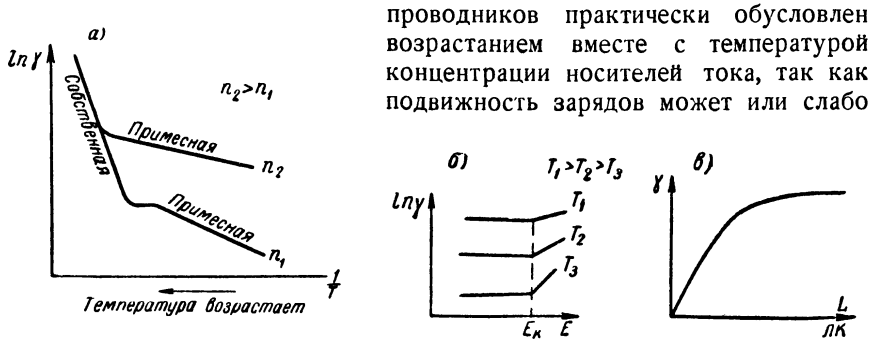


Рис. 160. Зависимость электропроводности полупроводника: *а* — от температуры; *б* — от напряженности электрического поля при различных температурах; *в* — от освещенности.

увеличиваться при низких температурах, или слабо понижаться в области более высоких температур.

Типичная кривая зависимости электропроводности от температуры приведена на рис. 160, *а*. Такую кривую удобно строить в полулогарифмическом масштабе, откладывая по оси ординат $\ln\gamma$, а по оси абсцисс $1/T$. Отрезки прямых в области низких температур характеризуют примесную электропроводность при различной концентрации носителей, затем имеется переходный участок (примесные уровни „истощились"), а в области высоких температур проявляется собственная электропроводность полупроводника. На основании этого рисунка для линейных участков может быть написано следующее уравнение:

$$\ln\gamma = \ln A_1 - b\frac{1}{T}, \tag{168}$$

откуда

$$\gamma = A_1 e^{-\frac{b}{T}}. \tag{169}$$

В точке излома значения постоянных A_1 и b меняются. Теория электропроводности полупроводников показывает, что для монокристаллов типа германия и кремния постоянная

$$b = \frac{w}{2kT}, \tag{170}$$

где w — энергия активации;

k — постоянная Больцмана.

Преобразовав формулу (169) с учетом (170), можно получить выражение для удельного электросопротивления:

$$\rho = Ae^{\frac{w}{2kT}}. \tag{171}$$

Используя опытные данные и строя кривые, подобные кривой, приведенной на рис. 160, *а*, вычисляют энергию активации w при собственной и примесной электропроводностях полупроводника.

При ширине запрещенной зоны германия 0,72 *эв* число собственных носителей тока в нем при комнатной температуре составляет величину порядка 10^{13} $см^{-3}$, в то время как примеси, составляющие тысячную долю процента, но обладающие малой энергией активации (w), вносят в него в десятки тысяч раз большее количество свободных зарядов. Поэтому для закономерного управления электропроводностью полупроводников с помощью вводимых примесей основной полупроводник должен быть предварительно тщательно очищен от случайных примесей. Это удается осуществить, вытягивая крупные монокристаллы полупроводника из расплава и подвергая их очистке методом перемещающейся зонной плавки и перекристаллизации.

Электропроводность полупроводников зависит от напряженности электрического поля. На рис. 160, *б* показаны кривые зависимости электропроводности одного и того же полупроводника от напряженности электрического поля при различных температурах окружающей среды. Как видно из рис. 160, *б*, при низкой напряженности поля

(до некоторого значения $E_к$) соблюдается закон Ома и электропроводность не зависит от напряженности поля, при более сильных полях начинается прогрессивный рост электропроводности по экспоненциальному закону, приводящий к разрушению структуры полупроводника. С ростом температуры кривая электропроводности перемещается вверх, а наклон возрастающей части становится меньше. В сильных полях для ряда полупроводников зависимость удельной электропроводности от напряженности поля описывается выражением

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta E}, \tag{172}$$

где γ_0 — удельная электропроводность полупроводника при $E < E_к$;
β — коэффициент, характеризующий полупроводник.

Возрастание электропроводности обусловлено ростом числа носителей тока, так как под влиянием поля они более легко освобождаются тепловым возбуждением. При дальнейшем росте поля может появиться механизм ударной ионизации, приводящий к разрушению структуры полупроводника.

Освещение полупроводников лучистой энергией приводит, как правило, к увеличению электропроводности.

На рис. 160, *в* показана зависимость удельной электропроводности полупроводника от освещенности. Эта кривая описывается следующим уравнением:

$$\gamma = BL^x, \tag{173}$$

где B — постоянная, характеризующая полупроводник;
L — освещенность;
x — величина, подчиняющаяся условию $1 > x > 0$.

Кванты видимого света обладают энергией 1,5—3 *эв*, а потому способны перебрасывать электроны из заполненной зоны в зону проводимости. Фотопроводимость является функцией частоты излучения и зависит от температуры окружающей среды. Понижение температуры увеличивает чувствительность полупроводников к освещению, так как при этом ослабляется фактор помехи, освобождающий электроны.

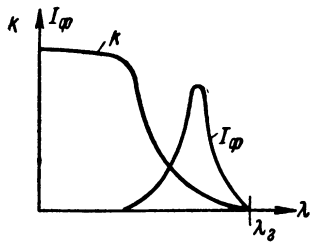


Рис. 161. Зависимость коэффициента поглощения K и фототока $I_ф$ от длины волны падающего излучения.

На рис. 161 показана зависимость коэффициента поглощения K и фототока $I_ф$ от длины волны падающего излучения. Кривая фототока свидетельствует о значительной селективности внутреннего фотоэффекта. Электромагнитные излучения с длиной волны, большей $\lambda_г$, не возбуждают фотопроводимости, ввиду малой энергии кванта ($h\nu$). С другой стороны, и очень коротковолновые кванты не создают фотопроводимости, так как это связано с резким ростом коэффи-

циента поглощения. При поглощении электромагнитной энергии только в тонком поверхностном слое весь объем полупроводника остается плохо проводящим.

§ 29. Термосопротивления (термисторы)

Термочувствительные сопротивления представляют собой объемные полупроводниковые сопротивления с большим отрицательным температурным коэффициентом:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho}\cdot\frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{Ae^{\frac{b}{T}}}Ae^{\frac{b}{T}}bT^{-2} = -\frac{b}{T^2}, \qquad (174)$$

т. е. температурный коэффициент этих сопротивлений не постоянен, с повышением температуры он уменьшается и находится в прямой зависимости от энергии активации полупроводника ($b \sim w$).

Сырьем для изготовления термосопротивлений могут служить различные окислы, например ZnO, MgO, CuO, Mn_3O_4, Fe_2O_3, а также сернистые соединения Ag_2S и др.

Термосопротивления изготовляются в виде стерженьков, пластинок, таблеток или бусинок методами керамической технологии. Электропроводность и другие свойства термосопротивления зависят не только от состава, но также от крупности зерна и технологического процесса изготовления: давления при прессовке (если полупроводник используют в виде порошка) и температуры обжига.

В табл. 71 приведены характеристики некоторых полупроводниковых веществ, которые можно применить для изготовления термосопротивлений. Данные этой таблицы показывают, что наибольшим α_ρ обладает сернистое серебро; численное значение этого коэффициента в десять раз больше, чем у металлов. Окись цинка при не очень большом значении удельного электросопротивления обладает отрицательным α_ρ, примерно равным положительному температурному коэффициенту удельного электросопротивления меди, что может быть использовано для целей термокомпенсации.

Таблица 71

Электрические характеристики некоторых полупроводников

Материал	Удельное электросопротивление, *ом·см*	α_ρ, *град*$^{-1}$
Ag_2S	500	$-5\cdot10^{-2}$
$CuO + Mn_3O_4$	50	$-3\cdot10^{-2}$
ZnO	1	$-0{,}5\cdot10^{-2}$

Меняя процентное содержание различных окислов, можно в широких пределах регулировать удельное электросопротивление и α_ρ тер-

мосопротивления. На рис. 162 приведены кривые ρ и α_ρ в зависимости от процентного содержания компонентов термосопротивления. Как видно из этого рисунка, значения удельного электросопротивления при изменении процентного содержания окислов могут отличаться в миллион раз; чем выше значение ρ, тем больше и α_ρ, что легко

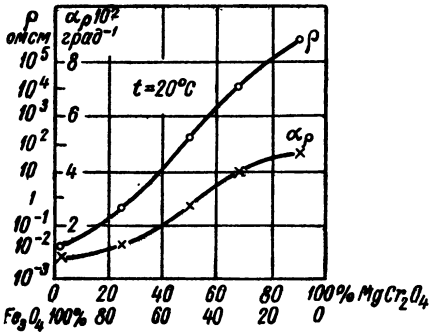


Рис. 162. Зависимость удельного электросопротивления и температурного коэффициента удельного электросопротивления термосопротивления от процентного содержания компонентов.

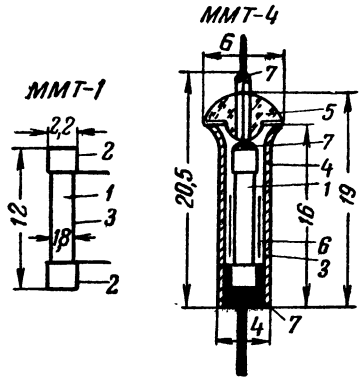


Рис. 163. Конструктивное оформление термосопротивлений.

1 — тело термосопротивления; *2* — контактные колпачки; *3* — слой эмалевой краски; *4* — защитный металлический чехол; *5* — стеклянный изолятор; *6* — металлическая фольга; *7* — слой олова.

объяснимо на основе теоретических положений, рассмотренных в предыдущем параграфе.

Большой температурный коэффициент термосопротивлений позволяет использовать их как термометры сопротивления.

В качестве примера технически завершенных типов термосопротивлений можно привести сопротивления ММТ-1, ММТ-4, конструктивное оформление которых показано на рис. 163.

Термосопротивление ММТ-1 предназначено для работы в закрытых сухих помещениях; сопротивление ММТ-4 герметизировано и может работать в воздухе с повышенной влажностью и даже в жидкостях. Номинальное значение электросопротивления ММТ находится в пределах от 1000 до 200 000 *ом* при 20° С, однако могут быть изготовлены сопротивления и на меньшие номиналы; α_ρ термосопротивлений ММТ при 20° С составляет величину порядка 0,03 *град*$^{-1}$. Они предназначены для работы в интервале температур от —100 до +120° С.

На рис. 164 приведена кривая изменения сопротивления термосопротивления типа ММТ от температуры. Здесь по оси абсцисс отложено изменение сопротивления в процентах от начального значения при 20° С, которое принято за единицу.

Сопротивления ММТ стабильны в работе, обладают достаточной механической прочностью и виброустойчивостью. Инерционность их характеризуется постоянной времени τ, под которой понимают

время, в течение которого термосопротивление при перенесении его из среды с температурой 0° С в среду с температурой 100° С уменьшает величину своего электросопротивления на 63%. Ввиду малой массы инерционность таких термосопротивлений невелика и соответствует данным, указанным в табл. 72.

Таблица 72

Постоянная времени термосопротивлений

Тип термосопротивления	τ в воздухе, *сек*	τ в воде, *сек*
ММТ-1	80	—
ММТ-4	110	4
Обычный ртутный термометр	105	4

Помимо основных случаев использования термосопротивлений для измерения и регулирования температур, а также термокомпенсации, они могут применяться для стабилизации напряжения, ограничения пусковых токов, измерения теплопроводности жидкостей, в качестве бесконтактных реостатов и токовых реле времени. В настоящее время разработано достаточно много типов различных термосопротивлений.

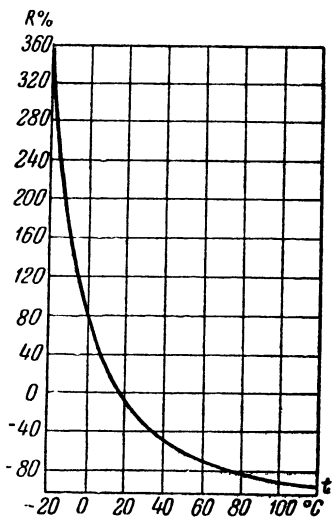


Рис. 164. Процентное изменение величины электросопротивления термосопротивления в зависимости от температуры.

§ 30. Нелинейные полупроводниковые сопротивления (НПС или варисторы)

Нелинейные сопротивления характеризуются резкой зависимостью электросопротивления от напряженности электрического поля. Они изготовляются из карбида кремния со связкой из керамики или стекла.

Карбид кремния — это соединение кремния с углеродом, теоретически отвечающее формуле SiC. Молекулярный вес его равен 40,07. Карбид кремния стехиометрического состава содержит 70,045% Si и 29,955% С. Его получают искусственным путем при нагревании проходящим током смеси кварцевого песка с углем до температуры порядка 2200° С. В зависимости от исходного сырья и условий ведения технологического процесса могут быть получены кристаллы различной окраски.

Некоторые физические свойства кристаллов карбида кремния приведены в табл. 73.

Низковольтные нелинейные сопротивления изготовляются в виде шайб или стерженьков из порошка карбида кремния с размерами зерен 40—50 *мкм*, скрепленных небольшим количеством связывающего вещества. Шайбы могут набираться в столбики. Материал с глинистой связкой называется т и р и т о м, а с ультрафарфоровой связкой — л э т и н о м.

На рис. 166 показана вольт-амперная характеристика варистора, снятая при помощи осциллографа на переменном напряжении. Как видно из рисунка, она симметрична при изменении полярности напряжения.

Сопротивления достаточно стабильны с течением времени и не боятся тряски. Их можно изготовить на различные токи и напряжения.

Вольт-амперная характеристика варисторов подчиняется следующему выражению:

$$I = KU^{\beta}, \qquad (175)$$

где β — коэффициент нелинейности, который может доходить до 7;

K — коэффициент, зависящий от материала и размеров сопротивления.

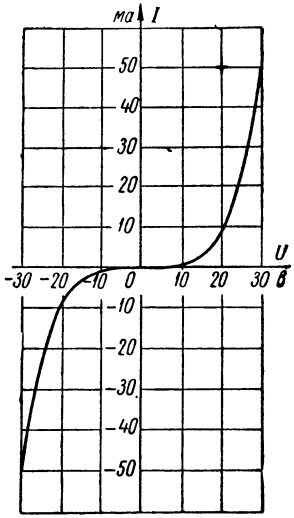


Рис. 166. Вольт-амперная характеристика НПС (варистора).

Такую вольт-амперную характеристику можно получить, если представить себе, что электропроводность сопротивления определяется многими параллельными цепочками контактирующих зерен, причем электрическая прочность контактов в различных цепочках имеет значительный разброс. Сказанное иллюстрируется рис. 167. На этом рисунке изображена приближенная эквивалентная схема варистора и вольт-амперные характеристики отдельных контактов, имеющих различные „напряжения перегиба". По мере увеличения приложенного напряжения включается все больше и больше параллельных цепей тока, и проводимость диска быстро возрастает.

Нелинейные сопротивления имеют много разнообразных применений. В качестве примера рассмотрим схемы последовательного и параллельного включений нелинейного сопротивления с нагрузкой, как показано на рис. 168.

Пусть генератор создает переменное синусоидальное напряжение (рис. 168, *I,а* — пунктирная синусоида). Ток и напряжение на зажимах нагрузки, в случае последовательного включения НПС и нагрузки, будут иметь форму, показанную сплошной линией на том же рисунке. При импульсном питании (рис. 168, *I, б* — пунктирная линия) форма импульса тока, а следовательно, и напряжения на нагрузке, будет более острой (сплошная линия на том же рисунке). При параллель-

ном включении НПС и нагрузки происходит сглаживание кривых напряжения и тока в нагрузке (рис. 168. *II,а* и *II,б*).

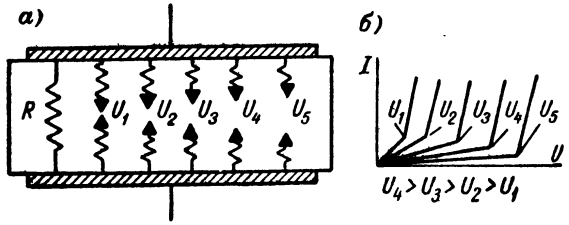


Рис. 167. Эквивалентная схема варистора с цепочками из зерен, имеющими различные значения „напряжения перегиба".

Рассмотренные схемы показывают, что нелинейные сопротивления могут быть использованы для импульсной техники в цепях пита-

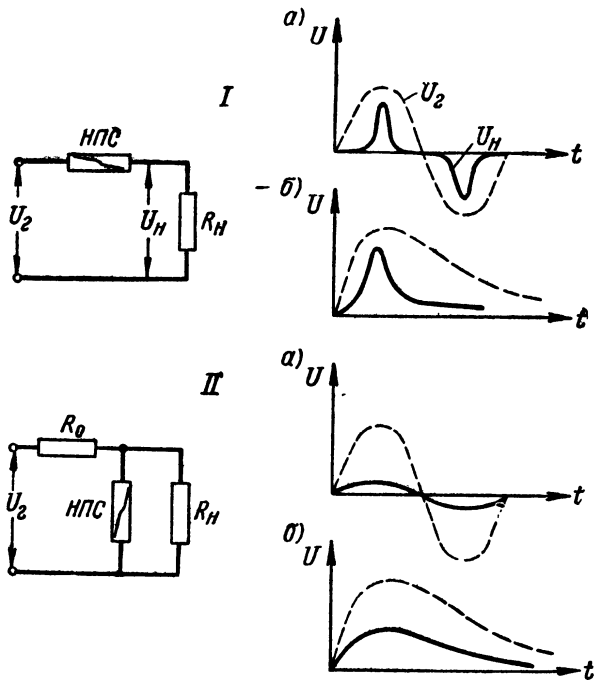


Рис. 168. Последовательное и параллельное включения нелинейного полупроводникового сопротивления (НПС) с нагрузкой ($R_н$).

ния реле, для умножения частоты, сглаживания и стабилизации напряжения, искрогашения на контактах и т. д.

Большой интерес представляет мостовая схема включения НПС, приведенная на рис. 169. В простейшем случае подбирают равные

по величине линейные сопротивления R и НПС с одинаковыми вольт-амперными характеристиками, причем при небольших напряжениях величина R меньше, чем электросопротивление НПС. При питании моста напряжением от источника постоянного тока и постепенном возрастании входного напряжения, напряжение на выходе сначала растет, затем электросопротивление НПС начинает уменьшаться и рост выходного напряжения замедляется. На участке от $U'_{вх}$ до $U''_{вх}$ наступит

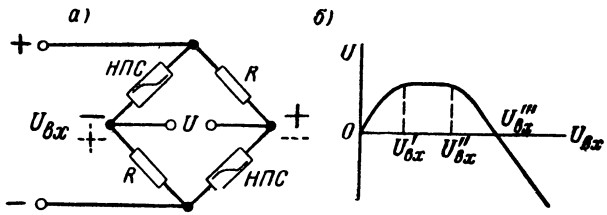


Рис. 169. Мостовая схема включения НПС (*а*) и зависимость (*б*) напряжения на выходе от величины напряжения постоянного тока на входе моста.

стабилизация выходного напряжения. При дальнейшем увеличении $U_{вх}$ напряжение на выходе начнет падать, так как мост при этом приближается к равновесию. При росте напряжения на входе получается падающий участок выходного напряжения. Когда величина электросопротивления НПС станет равна R, мост окажется в равновесии, т. е. при $U'''_{вх}$ напряжение на выходе $U=0$. При еще большем входном напряжении произойдет изменение полярности выходного напряжения и его дальнейший рост будет продолжаться.

Мостовая схема находит применение в стабилизаторах напряжения. Если линейные плечи моста R изготовить из материала с отрицательным температурным коэффициентом электросопротивления, таким же, как и у НПС, то можно выполнить термокомпенсированный мостовой стабилизатор с практически неизменным напряжением на выходе при изменении в широких пределах температуры окружающей среды. Мостовые схемы применяются также для автоматического регулирования и дешифровки импульсов.

Возведение в степень и извлечение корней с помощью НПС в счетно-решающих приборах осуществляют, используя сопротивления с параболической вольт-амперной характеристикой, имеющей определенный β. НПС с $\beta \approx 2$ называют квадраторами. Умножение двух величин достигается посредством схемы, приведенной на рис. 170. Через прибор, измеряющий ток, в противоположных направлениях протекают токи I_1 и I_2; оба НПС являются квадраторами. Тогда

$$I_1 = k(U_1 + U_2)^2 = k(U_1^2 + 2U_1U_2 + U_2^2);$$
$$I_2 = k(U_1 - U_2)^2 = k(U_1^2 - 2U_1U_2 + U_2^2);$$
$$\Delta I = I_1 - I_2 = 4kU_1U_2.$$

Таким образом, показание прибора будет пропорционально произведению напряжений U_1 и U_2.

Нелинейные полупроводниковые сопротивления позволяют решить задачу создания плоского электролюминесцентного экрана. Такой экран представляет собой стеклянную пластинку с проводящими полупрозрачными полосками, поверх которых нанесен сплошной слой электролюминофора. На люминофоре расположена система проводящих непрозрачных полос, перпендикулярных полупрозрачным. При приложении напряжения на две взаимно перпендикулярные полосы (полупрозрачную и непрозрачную) возникает крестообразное свечение, наиболее яркое в месте пересечения полос. Это обусловлено тем, что эквивалентная схема экрана описанной конструкции такова, что на элементах его под полосами оказывается половина напряжения, приложенного к полосам, если стороны экрана одинаковы.

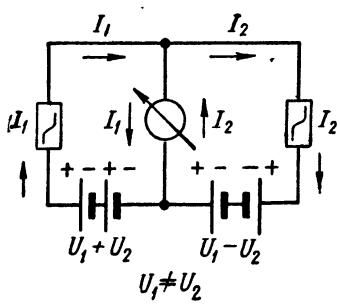


Рис. 170. Схема умножения двух величин с помощью квадратов.

Введение полупроводникового нелинейного слоя из карбида кремния под проводящие непрозрачные полосы позволяет значительно снизить паразитную засветку, что дает возможность применять такой экран для высококачественного воспроизведения светящейся точки.

При переключении соответствующих полос можно по желанию заставить светиться в любом месте экрана одну точку, причем яркость ее свечения соответствует приложенному напряжению. Это позволяет создать на экране подвижную мозаичную картину с тонами и полутонами.

§ 31. Выпрямители и детекторы (вентили, диоды)

Полупроводниковыми выпрямителями являются системы, содержащие полупроводник, обладающие резко различным электросопротивлением при изменении полярности приложенного к ним напряжения.

Детекторами называют высокочастотные выпрямители, отличающиеся малой собственной емкостью.

Для изготовления выпрямителей переменного тока можно использовать целый ряд полупроводников, однако наибольшее техническое значение получили селеновые, меднозакисные (купроксные), германиевые и кремниевые выпрямители.

Принцип действия полупроводникового выпрямителя удобно объяснять, пользуясь рис. 171. На этом рисунке изображена полупроводниковая пластинка, одна половина которой представляет собой дырочный полупроводник p, а другая — электронный полупроводник n. Граница между областями p и n получила название p — n-перехода.

Каждая часть пластинки в отдельности до контактирования была нейтральной, так как имело место равновесие свободных и связанных зарядов. Так как концентрация свободных электронов в области n больше, чем в p, а концентрация свободных дырок — наоборот, то после контактирования часть электронов под влиянием тепловой диффузии перейдет в область p, а некоторое количество дырок — в область n. При этом область p у перехода окажется заряженной отрицательно, а область n — положительно, возникнет диффузионное поле (рис. 171, *а*), которое прекратит дальнейшее перемещение зарядов, т. е. еще в отсутствии внешнего напряжения образуется запирающий слой толщиной порядка 10^{-5} *см*.

Если приложенное извне напряжение (рис. 171, *б*) создает электрическое поле, совпадающее с диффузионным, то переход будет „заперт", и ток не будет протекать.

При изменении полярности приложенного напряжения внешнее поле будет направлено в противоположную сторону по отношению к диффузионному полю, переход окажется насыщенным носителями тока, вследствие чего сопротивление его резко понизится, т. е. через него потечет большой по величине „прямой ток" (рис. 171, *в*). Рассмотренное относится к идеальному выпрямителю. У реального выпрямителя в области p всегда будет небольшое число свободных электронов, а в области n — некоторое количество дырок. Такие заряды получили название „неосновных носителей". На рис. 171, *б'* показано, что при запертом переходе через него течет небольшой по величине „обратный ток" за счет движения неосновных носителей тока.

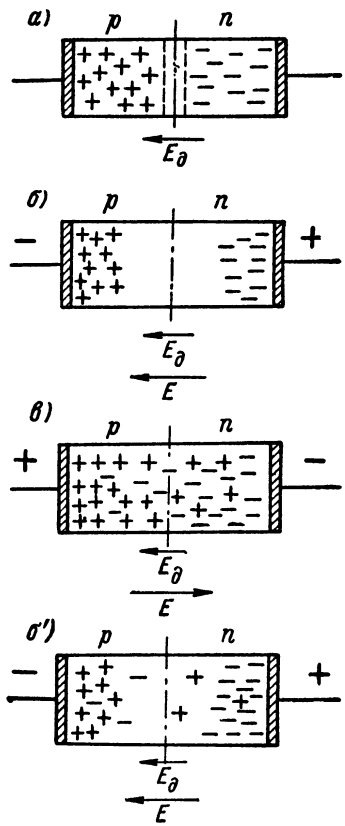


Рис. 171. Принцип действия полупроводникового выпрямителя.

а — идеальный p — n-переход в отсутствии внешнего напряжения (пунктиром показан запирающий слой); *б* — идеальный p — n-переход заперт (тока нет); *в* — через p — n-переход проходит большой величины прямой ток; *б'* — реальный p — n-переход заперт, протекает маленький обратный ток за счет неосновных носителей тока.

Меднозакисные выпрямители

При изготовлении меднозакисного выпрямителя пластину (чаще всего для удобства сборки в виде шайбы) из особо чистой красной меди помещают на 5 *мин* в печь с окислительной средой и темпе-

ратурой 1020 — 1040° С, а затем ее переносят во вторую печь с температурой 600° С, где выдерживают около 10 *мин.* Вынутые из второй печи шайбы охлаждают, погружая их в воду. После такой термической обработки медная пластина покрывается двумя слоями окислов: внутренним малиново-красного цвета (закисью меди Cu_2O) и внешним темно-серого цвета (окисью меди CuO). Окись меди, обладающую малой проводимостью, удаляют путем травления, обнажая закись меди, а одну из сторон шайбы дополнительно зачищают механическим путем до „материнской" меди. К меди припаивают выводы, а на поверхность закиси меди наносят контактный слой посредством распыления слабо окисляющегося металла.

Такая шайба, включаемая в цепь переменного тока, может служить

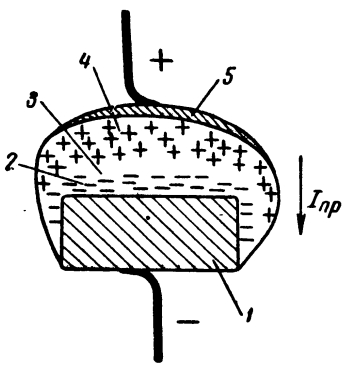


Рис. 172. Схема меднозакисного выпрямителя.

1 — медь; *2* — закись меди с примесью меди; *3* — запирающий слой; *4* — закись меди с избытком кислорода; *5* — контактный электрод.

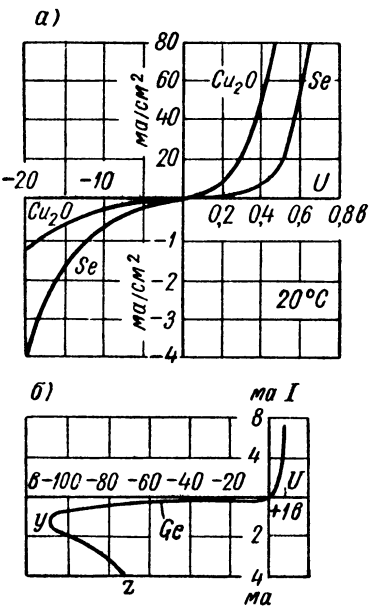


Рис. 173. Статические вольт-амперные характеристики: *а* — меднозакисного и селенового выпрямителей; *б* — германиевого выпрямителя.

выпрямителем (рис. 172). Закись меди, прилегающая к материнской меди, содержит донорную примесь меди, т. е. является примесным полупроводником типа *n*; дальше лежит слой чистой закиси меди — запирающий слой; наибольшую толщину имеет слой закиси с избытком кислорода — акцепторной примеси, создающей полупроводник типа *p*.

В качестве примера на рис. 173, *а* приведена статическая вольт-амперная характеристика отдельной шайбы меднозакисного выпрямителя. С ростом температуры прямой и обратный токи возрастают, причем последний в большей мере, вследствие чего выпрямление ухудшается.

Температурный интервал работы меднозакисных выпрямителей находится в пределах от — 40 до + 60° С. Допустимая плотность тока меднозакисных выпрямителей может доходить до 100 *ма/см*^{2}; максимальное рабочее падение напряжения на шайбе в запорном направлении должно быть не выше 8 *в*.

При больших значениях напряжения в обратном направлении, особенно при повышенных температурах, выпрямитель может быть пробит и окончательно выйти из строя. Удельная электрическая емкость меднозакисных выпрямителей в запорном направлении составляет величину порядка 0,01 *мкф/см*^{2}.

Меднозакисные выпрямители рекомендуется защищать от действия влаги, которая может увеличивать электросопротивление выпрямителя в прямом направлении, ухудшая условия контакта.

С течением времени меднозакисные выпрямители стареют, что выражается в падении величины прямого тока. Старение особенно заметно у только что изготовленных выпрямителей, вследствие чего ряд выпрямителей перед установкой в аппаратуру подвергают искусственному старению при повышенных температурах, чтобы обеспечить большую их стабильность в эксплуатации.

Иногда качество выпрямителя характеризуют условной величиной, называемой коэффициентом выпрямления, определяемым отношением прямого тока к обратному при одинаковых абсолютных значениях приложенного напряжения. Для меднозакисных выпрямителей эта величина находится в пределах от 500 до 5000.

Селеновые выпрямители

Селен — это элемент VI группы таблицы Д. И. Менделеева ($A \approx 78{,}96$), получаемый на сернокислотных заводах и при электролитической очистке меди. Селен существует в нескольких разновидностях — как аморфных, так и кристаллических, имеющих разную окраску. Серый кристаллический селен гексагонального строения характеризуется плотностью 4,8 *г/см*^{3}, температурой плавления 217° С, он мягок, имеет коэффициент линейного расширения $49 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Удельное электросопротивление селена не является постоянной величиной и сильно зависит от наличия примесей, освещения и температуры. По данным различных исследователей, для технически чистого селена оно колеблется в пределах от 10^4 до 10^6 *ом·см*.

Селеновые выпрямители изготовляются путем нанесения селена на никелированные железные или алюминиевые шайбы. Нагретые шайбы намазывают аморфным или порошкообразным селеном, прессуют для создания однородной толщины слоя и подвергают термической обработке при температуре около 220° С, чтобы получить кристаллический селен с удовлетворительной прямой проводимостью. На поверхность образовавшегося тонкого слоя селена (толщина от 30 до 80 *мкм*) наносят второй электрод из сплава, состоящего из 53% Bi, 21% Cd и 26% Sn, имеющего температуру

плавления около 105° С. Запирающий слой селеновых выпрямителей находится на границе между селеном и селенистым кадмием; селен обычно является дырочным полупроводником, и прямой ток в селеновом выпрямителе направлен от полупроводника к верхнему электроду, а не к электроду-подложке, как в меднозакисном выпрямителе.

На рис. 173, *а* показана вольт-амперная характеристика селенового выпрямителя. Как видно из этого рисунка, коэффициент выпрямления селенового выпрямителя меньше, чем меднозакисного выпрямителя, потому что при одинаковых значениях приложенного напряжения прямой ток селенового выпрямителя меньше, чем меднозакисного, а обратный ток больше.

Пороговое напряжение (напряжение, начиная с которого выпрямитель может работать) селенового выпрямителя выше, чем меднозакисного (от 0,1 до 0,2 *в* для меднозакисного, и от 0,3 до 0,4 *в* для селенового).

Допустимые плотности тока для селеновых выпрямителей имеют тот же порядок, что и для меднозакисных выпрямителей, а рабочие значения напряжения в обратном направлении значительно выше и могут доходить до 18—36 *в* на шайбу, что сокращает необходимое число шайб в выпрямителе на одно и то же выпрямляемое напряжение.

Пробой селеновых выпрямителей происходит при перенапряжении с амплитудой порядка 80 *в*, причем в ряде случаев пробитое место заплавляется слоем аморфного селена с очень малой проводимостью, вследствие чего выпрямитель в целом может продолжать работу.

Температурный интервал работы селеновых выпрямителей шире, чем меднозакисных, и составляет от —60 до +75° С. Удельная емкость селеновых выпрямителей такая же, как и меднозакисных. Селеновые выпрямители лучше выносят перегрузку, чем меднозакисные, они имеют меньший вес при одинаковой мощности и характеризуются, как правило, более длительным сроком службы, доходящим до 10 000 *час*. Селеновые выпрямители меньше подвержены действию влаги, чем меднозакисные.

Полупроводниковые выпрямители применяют для зарядки аккумуляторов, питания радиоустройств и установок проводной связи а также для различных измерительных целей.

Германиевые и кремниевые диоды

Германий и кремний в настоящее время являются основными полупроводниковыми материалами для производства кристаллических диодов и триодов. Свойства этих полупроводников приведены в табл. 74.

Кристаллический германий получают восстановлением окиси германия или другими способами из его хлористых или сернистых соединений. Электросопротивление чистого германия очень чувствительно

тилей. В этом заключается основное преимущество германиевых диодов.

Таблица 74

Свойства германия и кремния

Свойства	Единица измерения	Германий	Кремний
Атомный вес	—	72,6	28,06
Атомный объем	—	13,5	11,7
Постоянная решетки	Å	5,66	5,42
Ковкость	—	Хрупкий	Хрупкий
Плотность при 20°С	*г/см*^{3}	5,3	2,3
Температурный коэффициент линейного расширения при 0—100° С	*град*$^{-1}$	$6{,}0\cdot10^{-6}$	$4{,}2\cdot10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности	*кал/см·сек·град*	0,14	0,2
Удельная теплоемкость при 0—100° С	*кал/г·град*	0,08	0,17
Температура плавления	°С	936	1414
Теплота плавления	*ккал/моль*	7,3	11,1
Коэффициент поверхностного натяжения (при температуре плавления)	*дин/см*	600	720
Собственное удельное электросопротивление при 20° С	*ом·см*	68	200 000
Собственная концентрация основных носителей	*см*$^{-3}$	$2{,}5\cdot10^{13}$	10^{10}
Ширина запрещенной зоны	*эв*	0,72	1,12
Подвижность электронов	*см*^{2}*/в·сек*	3900	1400
Подвижность дырок	„	1900	500
Работа выхода электронов	*эв*	4,8	4,3
Первый ионизационный потенциал	*в*	8,1	8,14
Диэлектрическая проницаемость	—	16	12,5
Термо-э. д. с. относительно платины при 100° С	*мв*	33,9	41,6

Германиевые детекторы чувствительны к изменению температуры; так, при повышении температуры до $+70°$ С прямой ток увеличивается примерно в два раза, а обратный почти в три раза. При охлаждении до —50°С прямой ток падает на 70%.

С увеличением частоты от 1 до 100 *Мгц* коэффициент выпрямления уменьшается на 20—40%, вследствие увеличения потерь в детекторе. Электрическая емкость германиевых детекторов, как правило, составляет 0,2—0,4 *пф*. Благодаря хорошей герметизации они влагостойки, однако попадание даже небольших количеств влаги в корпус детектора приводит к выходу его из строя.

Германиевые детекторы нашли применение в измерительной аппаратуре, в различных типах радиоприемников и телевизоров.

Кремниевые детекторы по сравнению с германиевыми могут работать при более высоких температурах (до $+125°$ С), они

очень чувствительны, пороговое напряжение их может быть порядка 0,01 *в*, а собственная емкость 0,25—1 *пф*. Такие детекторы применяются до частот $3 \cdot 10^4$ *Мгц*.

Кроме точечных, выпускаются плоскостные германиевые и кремниевые диоды на прямые токи до 400 *ма* и амплитуды обратных напряжений до 400 *в*. Отдельные виды плоскостных диодов позволяют получать выпрямленные токи до 50 *а* при амплитуде обратного напряжения 50—100 *в*. У диодов с принудительным охлаждением прямые токи достигают сотен ампер.

§ 32. Полупроводниковые триоды (транзисторы)

Возможность применения полупроводников для усиления и генерирования колебаний была открыта сотрудником Нижегородской радиолаборатории имени В. И. Ленина О. В. Лосевым в 1922 г. Он назвал свой прибор кристадином.

Недостаточная изученность свойств полупроводников привела к тому, что до последнего времени техническое применение имели только электронные лампы. Дальнейшие исследования механизма проводимости полупроводников позволили американским исследователям Бардину и Браттейну в 1948 г. разработать полупроводниковые триоды; несколько позже были созданы кристаллические тетроды.

Полупроводниковые триоды не имеют цепей накала, они вступают в работу сразу после включения, собственное потребление энергии их очень мало, они не нуждаются в создании вакуума, очень легки и отличаются высокой устойчивостью к вибрациям.

К недостаткам германиевых триодов относится большая зависимость их характеристик от температуры. Кремниевые же триоды могут работать при более высоких температурах.

Германиевый триод представляет собой пластину полупроводника, в которой между двумя областями с однотипной проводимостью находится область проводимости противоположного типа. От этих трех областей сделаны три вывода триода, получившие следующие названия в литературе: вход (эмиттер), выход (коллектор) и общий электрод (база). Током в цепи коллектора можно управлять, изменяя напряжение в цепи эмиттера, т. е. создавать явление, аналогичное зависимости анодного тока трехэлектродной лампы от напряжения на сетке. Однако входное сопротивление кристаллических триодов, как правило, в 100 и более раз меньше выходного (цепи нагрузки), т. е. обратно соотношениям в обычных электронных лампах.

В настоящее время известно несколько видов полупроводниковых триодов, основными из которых являются плоскостные триоды ($n-p-n$ или $p-n-p$).

При изготовлении плоскостного триода типа $p-n-p$ в пластину электронного германия с двух сторон вплавляют индий. Диффузия атомов индия (элемента III группы таблицы Менделеева) в германий с электропроводностью типа n создает систему с двумя пере-

коллектора резко возрастет, как это видно из рис. 177, и во много раз превзойдет сопротивление эмиттерной цепи. Поэтому хотя плоскостные триоды обладают коэффициентом усиления по току меньшим единицы, усиление по мощности может быть достаточно большим.

Отечественной промышленностью выпускаются триоды различных типов мощностью от десятков милливатт до нескольких ватт. Рабочая частота триодов доходит до десятков мегагерц.

Внешний вид плоскостных полупроводниковых триодов показан на рис. 178.

Наличие падающего участка вольт-амперной характеристики германиевых детекторов (участок $y - z$ на рис. 173) и сложный механизм электропроводности германиевых триодов дают возможность использовать их в качестве генераторов высокочастотных колебаний.

Анализ различных радиотехнических схем показывает, что более 70% электронных ламп в самых разнообразных областях их применения может быть заменено кристаллическими диодами и триодами.

§ 33. Фотоэлементы и фотосопротивления

Фотоэлектрические приборы, основанные на свойствах полупроводников, можно подразделить на фотоэлементы с запирающим слоем и фотосопротивления.

Фотоэлементы

Фотоэлементы с запирающим слоем способны развивать электродвижущую силу под влиянием падающей на них лучистой энергии.

Широко распространен селеновый фотоэлемент, схематический разрез которого показан на рис. 179, *а*. В нем основным полупро-

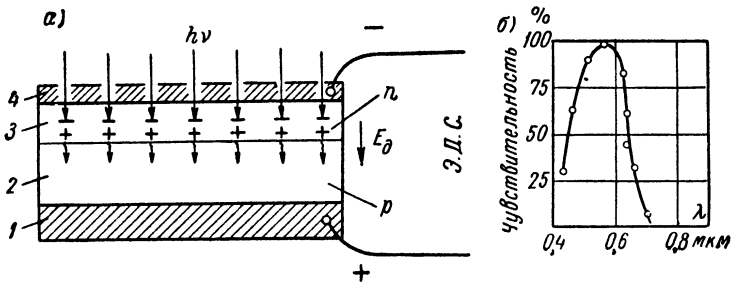


Рис. 179. Схематический разрез селенового фотоэлемента (*а*) и кривая его спектральной чувствительности (*б*).

1 — металлический электрод; *2* — слой селена с дырочной проводимостью; *3* — тонкий слой с электронной проводимостью; *4* — тонкий полупрозрачный электрод из золота.

водниковым слоем является слой селена с дырочной проводимостью типа *р*. Путем технологической обработки на его поверхности под

тонким полупрозрачным электродом из золота образуется полупроводниковый слой с проводимостью типа *n*. В запорном слое $p-n$-перехода возникает, как было отмечено выше, диффузионное электрическое поле, направление которого видно из рис. 179, *а*. При освещении фотоэлемента энергия квантов $h\nu$ затрачивается на образование в верхнем полупроводниковом слое электронно-дырочных пар. Под воздействием диффузионного поля $p-n$-перехода дырки переходят в область *p*, а электроны остаются в области *n*, вследствие чего нижний электрод заряжается положительно, а верхний — отрицательно. Чувствительность селеновых фотоэлементов зависит от длины волны падающего света, находится в узкой видимой части спектра (рис. 179, *б*) и доходит до 500 *мка/лм*. Коэффициент полезного действия селенового фотоэлемента составляет около 0,2%.

К вентильным фотоэлементам относятся также серно-таллиевые, серно-серебряные, германиевые и кремниевые фотоэлементы. Кремниевые фотоэлементы с коэффициентом преобразования лучистой энергии, достигающим десятка %, получили название „солнечных батарей" и могут уже служить источником питания радиоаппаратуры. Подобные фотоэлементы были установлены на третьем советском искусственном спутнике Земли. Серно-таллиевые, германиевые и некоторые другие полупроводниковые фотоэлементы „видят" в невидимой для человеческого глаза инфракрасной области спектра (длина волны до нескольких микрон), что представляет большой интерес для техники, так как длинные волны наиболее слабо рассеиваются атмосферой.

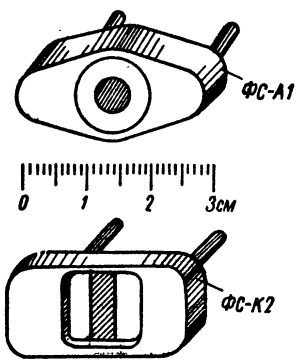


Рис. 180. Внешний вид фотосопротивлений.

Фотосопротивления

Полупроводниковые фотосопротивления изменяют величину своего электросопротивления под воздействием лучистой энергии (внутренний фотоэффект).

Фотосопротивления могут изготовляться из различных сернистых соединений (TlS, PbS, CdS, Bi_2S_3), а также из кремния и ряда других веществ. Под действием приложенного напряжения через фотосопротивление течет ток, величина которого увеличивается при освещении сопротивления, вследствие роста электропроводности, по выражению (173).

Фотосопротивления обладают высокой чувствительностью, имеют малые габариты, достаточно стабильны с течением времени; они изготовляются по простой и массовой технологии.

Примерами промышленных типов фотосопротивлений являются сопротивления ФС-А1 (из сернистого свинца), ФС-К1 и ФС-К2 (из сер-

нистого кадмия). Внешний вид этих сопротивлений, заключенных в пластмассовые корпуса и пригодных для включения в ламповую панельку, показан на рис. 180. Спектральная чувствительность фотосопротивлений характеризуется кривыми рис. 181.

Как видно из рис. 181, спектральная чувствительность фотосопротивления ФС-А1 охватывает очень широкую область инфракрасной части спектра, простираясь до 3,2 *мкм*, а чувствительность ФС-К1 и ФС-К2 ограничена узким диапазоном длин волн от 0,4 до 0,8 *мкм*. Вольтамперная характеристика ФС-А1 линейна до 20 *в*, причем значение тока при освещенности 120 *лк* составляет 30 *мка*.

В табл. 75 приведены размеры светочувствительной поверхности и величины темнового сопротивления ФС-А1, ФС-К1 и ФС-К2.

Чувствительность описываемых фотосопротивлений возрастает с понижением температуры.

Фотосопротивления из сернистого таллия обладают спектральной чувствительностью, охватывающей инфракрасную область спектра; они предназначены для работы при напряжениях от 30 до 60 *в*.

Фотосопротивления из кремния имеют линейную зависимость между фототоком и освещенностью. Спектральная чувствительность их находится в пределах от 0,3 до 1,2 *мкм*.

Фотоэлементы и фотосопротивления применяются в телевидении, в звуковом кино и в целом ряде специальных схем фотоэлектрической автоматики.

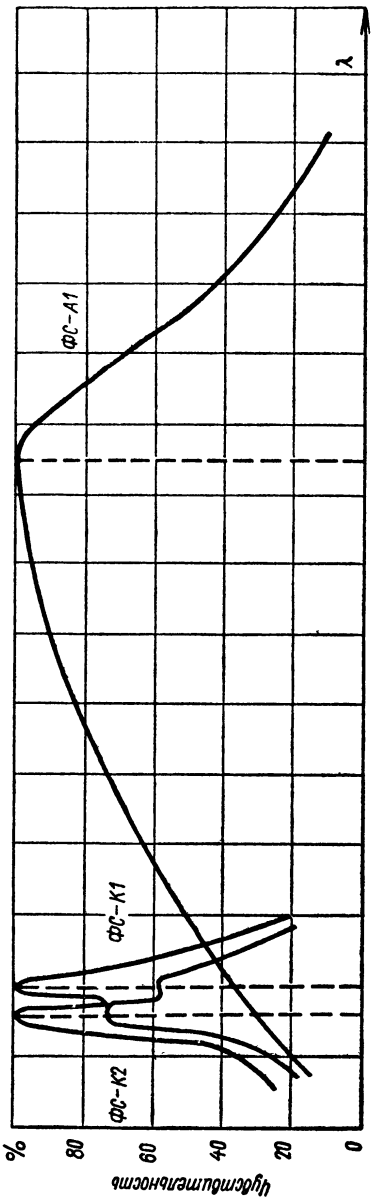


Рис. 181. Кривые спектральной чувствительности фотосопротивлений при + 20° С.

В последнее время удалось сочетать явление усиления тока германиевым триодом с внутренним фотоэффектом и создать фотополупроводниковый усилитель. В фототранзисторе дырки в германии

типа *n* образуются за счет поглощения света. Эти дырки попадают в сферу действия коллектора и создают усиленный фототок.

Таблица 75

Данные фотосопротивлений типов ФС-А1, ФС-К1 и ФС-К2

Тип фотосопротивления	Размеры светочувствительной поверхности, *мм*²	Темновое сопротивление
ФС-А1	21	От 30 до 300 *ком*
ФС-К1	28,8	3,3 *Мом*
ФС-К2	28,8	3,3 „

Внутренний фотоэффект может также наблюдаться при поглощении полупроводником средних и быстрых электронов, а также частиц больших масс. Так, при поглощении α-частицы возникает импульс тока продолжительностью около 0,05 *мксек*, соответствующий прохождению 10^6 электронов. Поэтому полупроводники могут быть использованы в качестве счетчиков ядерных частиц.

§ 34. Различные применения полупроводников

Термоэлектрогенераторы и термохолодильники

В 1821 г. немецким физиком Зеебеком было открыто явление непосредственного превращения тепловой энергии в электрическую с помощью термопары из двух металлических пластинок. В 1834 г. французский часовщик Пельтье обнаружил, что на стыке двух разнородных проводников электрический ток, в зависимости от направления, выделяет или поглощает тепло.

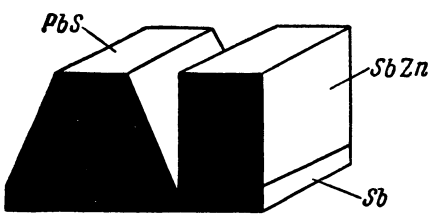


Рис. 182. Конструкция термоэлемента.

Металлические термопары нашли широкое применение для измерительных целей (измерение температур), но они не представляют интереса в качестве термогенераторов, так как имеют незначительный коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую (порядка десятой доли процента) и очень мало эффективны в холодильных устройствах, где с их помощью удавалось достигать снижения температуры холодного спая по сравнению с нагретым менее, чем на 10° С.

Академиком А. Ф. Иоффе в 1950 г. было показано, что при использовании полупроводниковых пар коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую может быть доведен до величины

порядка 10% и что снижение температуры холодного спая по отношению к горячему может составлять несколько десятков градусов.

В первых моделях термоэлектрогенераторов термоэлементы изготовлялись из сернистого свинца (отрицательная ветвь термоэлемента) и из интерметаллического соединения сурьмы и цинка (с небольшими добавками олова и висмута), обладающего полупроводниковыми свойствами (положительная ветвь). Обе ветви соединялись посредством сурьмяного электрода.

Ассортимент полупроводниковых материалов для изготовления термоэлементов в настоящее время значительно расширился — для этой цели используются Bi — Te — Se, Bi — Sb — Te и др.

Одна из конструкций термоэлемента приведена на рис. 182. В генераторе такие элементы соединяются в батарею, которая может обладать мощностью порядка 10 *вт*.

Полупроводниковые холодильники оказались наиболее рентабельными при небольших рабочих объемах. Такие микрохолодильники целесообразно использовать для термостатирования узлов радиоаппаратуры или даже целых приборов; на принципе термоохлаждения можно конструировать также гигрометры для измерения влажности воздуха.

Игнитронные поджигатели

Игнитронные выпрямители представляют собой одну из разновидностей выпрямителей с ртутным катодом. Отличие их от обычных ртутных выпрямителей заключается в том, что катодное пятно на поверхности ртути, являющееся источником свободных электронов, возникает у них периодически, вследствие пропускания тока через полупроводниковый поджигатель.

На рис. 183, *а* приведена простейшая схема однофазного игнитронного выпрямителя. При повышении напряжения в полупериод, соответствующий пропусканию тока через вентиль *7*, напряжение на поджигателе *6* возрастает, около его конца появляются искорки, переходящие в маломощную дугу между держателем поджигателя и ртутью. Эта дуга поддерживает катодное пятно, которое дает возможность образовываться основной дуге между анодом и катодом, если цепь нагрузки замкнута и к выпрямителю подведено достаточное напряжение. В полупериод, соответствующий запертому состоянию вентиля *7*, поджигание не происходит, пространство деионизируется, вследствие чего основная цепь выпрямителя не пропускает тока. Таким образом, поджигание осуществляется через каждый полупериод.

К полупроводниковому материалу поджигателя предъявляются следующие требования: он должен иметь удельное электросопротивление в пределах от 1 до 10 *ом · см*, не смачиваться ртутью, не нарушать вакуума в колбе выпрямителя, не бояться повышенных температур до 500—600° С, обладать достаточной механической прочностью

с тем, чтобы конец его не обламывался при ударах ртути при перевозках и в эксплуатации.

Основными электрическими параметрами поджигателя являются напряжение и ток в момент поджигания. Хорошие поджигатели имеют среднее значение напряжения поджигания 60—90 *в* и тока поджигания 2—3 *а*.

Внешний вид полупроводникового поджигателя показан на рис. 183, *б*.

Поджигатели изготовляются из порошкообразного карбида кремния и кристаллического кремния на бакелитовой связке. Отпрессован-

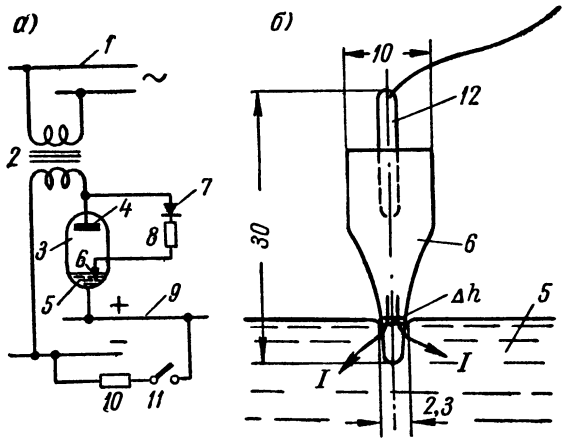


Рис. 183. Схема однофазного игнитронного выпрямителя (*а*) и эскиз полупроводникового поджигателя (*б*):

1 — шины переменного тока; *2* — трансформатор питания; *3* — баллон игнитрона; *4* — анод; *5* — ртутный катод; *6* — полупроводниковый поджигатель; *7* — полупроводниковый выпрямитель в цепи поджигателя; *8* — сопротивление в цепи поджигателя; *9* — шины выпрямленного постоянного тока; *10* — нагрузочное сопротивление; *11* — рубильник в цепи нагрузки; *12* — запрессованный металлический держатель.

ные поджигатели подвергаются высокотемпературному обжигу в течение одной минуты в магнезиальной обмазке. Такие поджигатели отличаются очень высокой механической прочностью, имеют вполне удовлетворительные параметры поджигания и достаточно длительный срок службы.

Игнитронные поджигатели изготовляют также из карбида бора на керамической связке.

Параметрами поджигания готового поджигателя можно управлять, изменяя шероховатость поверхности его посредством ионной бомбардировки. Это возможно осуществить потому, что механизм поджигания обусловлен автоэлектронной эмиссией из ртутного катода в микрозазорах между телом поджигателя и охватывающей его конец ртутью. Поджигание происходит тогда, когда напряженность электрического поля в переходном слое (рис. 183, *б*) достигнет опре-

деленного значения. При этом плотность тока поджигания должна быть также определенной для полупроводника с известным значением удельного электросопротивления:

$$E = \rho_{\text{п}} i. \tag{176}$$

Ток поджигания равен:

$$I = iS, \tag{177}$$

где S — площадь зубчиков кольцевого слоя вблизи поверхности ртути, через которую ток из поджигателя переходит в ртуть.

Ввиду того, что $\rho_{\text{п}} \gg \rho_{\text{рт}}$, высота переходного слоя Δh будет мала (рис. 183, *б*).

Меняя шероховатость поверхности, мы можем уменьшать S, а следовательно, и величину тока поджигания.

Напряжение поджигания составит:

$$U = U_{\text{т}} + U_{\text{п}} = IR_{\text{т}} + U_{\text{п}}, \tag{178}$$

где $U_{\text{т}}$ — падение напряжения на теле поджигателя;

$U_{\text{п}}$ — падение напряжения на переходном слое;

$R_{\text{т}}$ — сопротивление тела поджигателя.

Уменьшая величину тока поджигания, мы тем самым уменьшаем падение напряжения на теле поджигателя, а вследствие этого и общее значение напряжения поджигания.

Технические применения эффекта Холла

Рассмотренный в § 28 эффект Холла может быть использован для многих технических целей. Так, с помощью датчиков эффекта Холла можно измерять напряженности постоянных и переменных магнитных полей. При этом удается получить прямой отсчет напряженности поля по измерительному прибору, в котором отсутствуют движущиеся в магнитном поле части. Э. д. с. Холла линейно связана с напряженностью измеряемого поля. Датчики имеют малые размеры, они прочны, не боятся вибраций, легко регулируются и подключаются к простейшей электрической измерительной схеме.

В табл. 76 приведена вольтовая чувствительность датчиков эффекта Холла из различных полупроводниковых материалов.

Таблица 76

Чувствительность датчиков эффекта Холла

Материал датчика	Вольтовая чувствительность, *мкв/э*
Ge (*p*)	42
HgSe	13
HgTe	6

Датчики эффекта Холла можно использовать в качестве компаса и для измерения напряженности поля земного магнетизма. Эффект Холла позволяет осуществить преобразование постоянного напряжения в переменное. Для этого датчик, по которому протекает постоянный ток, достаточно поместить в переменное магнитное поле, и мы получим переменную э. д. с. эффекта Холла. Эффект Холла можно использовать для генерирования колебаний, измерения тока и мощности, модулирования сигналов, детектирования, анализа частот и для ряда других целей.

Полупроводниковые поглотители

Передача энергии на частотах свыше 1000 *Мгц* осуществляется с помощью волноводов. Энергия при этом переносится электромагнитным полем, а стенки волновода служат своего рода направляющими для распространяющихся волн.

Волноводы представляют собой полые металлические трубы с тщательно полированной внутренней поверхностью, покрытые тонким слоем неокисляющегося металла или изоляционного лака с малыми потерями (см. рис. 147). Для измерительных целей применяют устройства, позволяющие отделить часть мощности, а иногда и поглотить без отражения всю поступающую мощность. Такие устройства получили название аттенюаторов и оконечных нагрузок или поглотителей.

Конструирование аттенюаторов и оконечных нагрузок связано с решением двух задач: выбора материала, в котором должна рассеиваться мощность, и согласования полных сопротивлений нагрузки и волновода, чтобы эффект отражения волн был, по возможности, исключен.

Волноводные нагрузки изготовляются на средние значения мощности от долей ватта и до киловатт и на импульсные мощности до мегаватт; они должны обеспечивать затухание порядка 30—40 *дб* и коэффициент стоячей волны напряжения (к. с. в. н.) не более 1,05 (он определяется как отношение амплитуды максимума к амплитуде ближайшего минимума волны в волноводе). Если к. с. в. н. превышает указанное значение, то это значит, что происходит большое отражение от нагрузки, и она считается плохо согласованной.

Так как от металлических проводников электромагнитные волны практически полностью отражаются, а через диэлектрики с малыми потерями они полностью проходят, то для указанных выше целей применяют полупроводники.

Для изготовления поглотителей используются карбид кремния или кристаллический кремний с фарфоровой связкой, графит с цементом; могут быть изготовлены и ферритовые поглотители (см. § 37).

В табл. 77 приведены значения затухания в зависимости от тангенса угла потерь и относительной диэлектрической проницае-

мости поглощающего материала, полностью заполняющего сечение волновода.

Из таблицы видно, что поглощающие материалы должны иметь tg δ от 0,1 до 1 и повышенное значение диэлектрической проницаемости, однако слишком большие величины ε′ также нежелательны из-за роста энергии отраженной от нагрузки волны, т. е. ухудшения условий согласования.

Таблица 77

Затухание на длину волны в зависимости от параметров материала

tg δ	Затухание на длину волны, *дб*	
	ε′ = 4	ε′ = 40
0,01	0,57	1,8
0,1	5,7	18
1,0	49	157

Внешний вид одного из типов волноводных поглотителей показан на рис. 184, *а*.

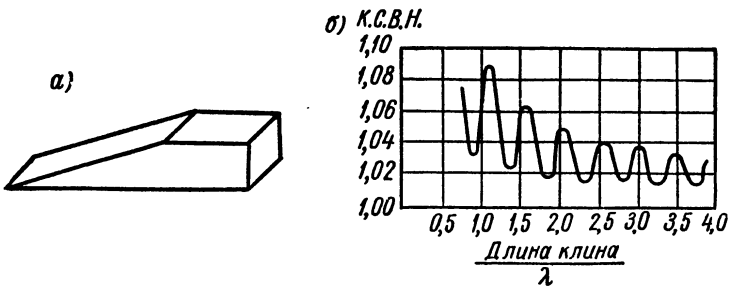


Рис. 184. Эскиз волноводного поглотителя (*а*) и зависимость к. с. в. н. от отношения длины клина к длине волны в волноводе (*б*).

Сечение нескошенной части поглотителя обычно равно сечению волновода. Длина поглотителя выбирается наибольшей, в зависимости от имеющегося места и прочности материала. Длина скошенной части должна быть кратной четверти длины волны в волноводе, как это следует из рис. 184, *б*.

Обзор применения полупроводников в различных областях радиоэлектроники показывает, как разнообразны и широки задачи, которые можно решать с их помощью.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ
МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 35. Общие сведения о магнитных свойствах материалов

В качестве магнитных материалов техническое значение приобрели ферромагнитные вещества (см. § 2 и 3).

Основной причиной возникновения магнитных свойств материалов являются внутренние скрытые формы движения электрических зарядов, представляющие собой элементарные круговые токи. Такими

чайшего ферромагнитного порошка на границах отдельных доменов. Эти узоры получили название фигур Акулова. Их можно видеть под оптическим микроскопом на поверхности железа, никеля, кобальта и других ферромагнетиков.

На рис. 185 приведены фотографии формы доменов различных ферромагнетиков.

Монокристаллы ферромагнитных веществ характеризуются магнитной анизотропией, сводящейся к различной легкости намагничивания вдоль разных осей.

На рис. 186 показаны направления легкого, среднего и трудного намагничивания в монокристаллах трех основных ферромагнитных

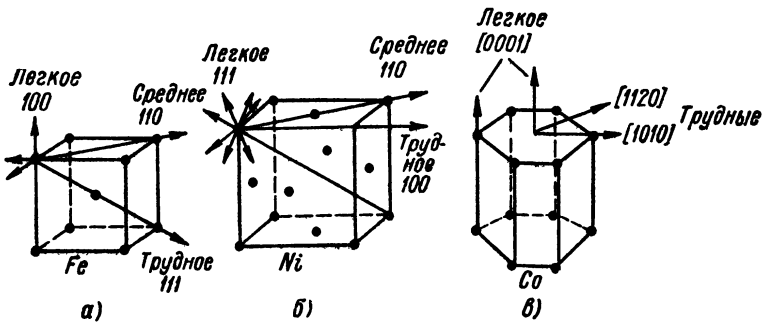


Рис. 186. Направления легкого и трудного намагничивания в монокристаллах:

а — железа; *б* — никеля; *в* — кобальта.

элементов: железа, никеля и кобальта. Из этого рисунка видно, что легким направлением намагничивания для ячейки монокристалла железа будет ребро куба, а наиболее трудным — диагональ; для ячейки никеля направление вдоль ребра куба будет соответствовать, наоборот, направлению трудного намагничивания.

В тех случаях, когда анизотропия в поликристаллических ферромагнетиках выражена достаточно резко, принято говорить, что ферромагнетик обладает магнитной текстурой, или текстурой доменов. Возможность достижения заданной магнитной текстуры имеет большое значение и используется в технике для создания в определенном направлении повышенных магнитных характеристик материала.

Процесс намагничивания ферромагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля сводится:

1) к увеличению тех доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением поля, и уменьшению размеров других доменов (процесс смещения границ доменов);

2) к повороту векторов магнитных моментов в направлении внешнего поля (процесс ориентации).

Магнитное насыщение достигается тогда, когда рост доменов прекратится и магнитные моменты всех спонтанно намагниченных микрокристаллических участков окажутся ориентированными в направлении поля.

Схема ориентации спинов в доменах приведена на рис. 187.

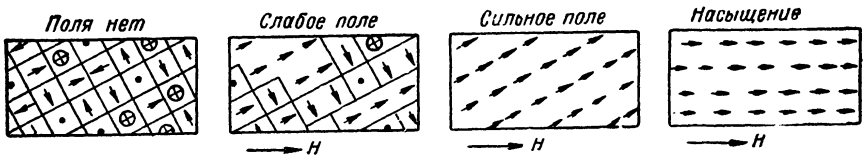


Рис. 187. Ориентация спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика.

При намагничивании ферромагнитных монокристаллов наблюдается изменение их линейных размеров; это явление называется магнитострикцией. Величина магнитострикции монокристалла железа различна для разных направлений в кристалле. Так, монокристалл железа, намагниченный в направлении ребра куба, удлиняется в направлении диагонали, т. е. сжимается в направлении намагничивания. Магнитострикция проявляется и в поликристаллических материалах.

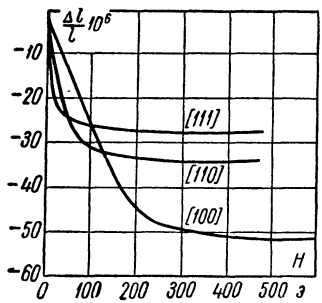


Рис. 188. Кривые магнитострикционной деформации монокристалла никеля по главным направлениям.

Из трех основных ферромагнитных элементов (Fe, Ni, Co) наибольшей магнитострикцией обладает никель. На рис. 188 приведены кривые зависимости относительного изменения линейных размеров монокристалла никеля по различным его осям от напряженности внешнего поля.

Знак магнитострикционной деформации у различных материалов может быть как положительным, так и отрицательным; изменение этого знака может наблюдаться также у одного и того же материала (например железа) при изменении величины напряженности поля.

Протекание процессов намагничивания ферромагнитного материала практически характеризуют кривыми намагничивания $B = F(H)$, имеющими качественно общий характер для всех ферромагнетиков.

На рис. 189 представлены так называемые основные кривые намагничивания некоторых магнитных материалов. Из этого рисунка видно, что магнитная проницаемость получается по основной кривой намагничивания как отношение величины индукции B к соответствующему значению напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания (рис. 190).

В настоящее время в технической литературе приходится встречаться с выражением индукции и напряженности магнитного поля как в единицах системы CGSM, так и MKSA. Поэтому надо уметь производить пересчет значений этих величин, а также связанных с ними единиц из одной системы в другую. Так, например, относитель-

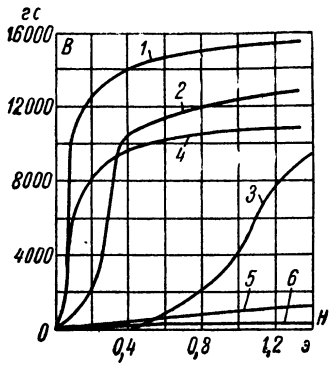


Рис. 189. Кривые намагничивания:

1 — особо чистого железа; *2* — чистого железа (99,98% Fe); *3* — технически чистого железа (99,92% Fe); *4*—пермаллоя (78% Ni); *5* — никеля; *6* — сплава железо — никель (26% Ni).

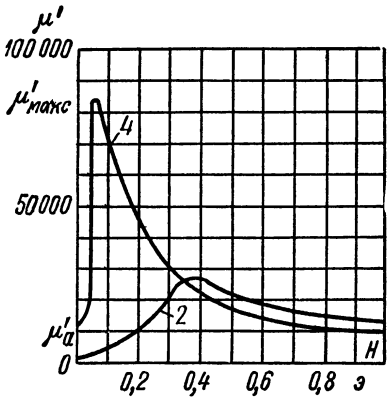


Рис. 190. Зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля:

2 — чистое железо (99,98% Fe); *4* — пермаллой (78% Ni).

ная магнитная проницаемость ферромагнитного материала может быть получена следующим образом:

$$\mu' = \frac{B\,[вб/м^2]}{\mu_0\,[гн/м]\cdot H\,[а/м]} = \frac{\dfrac{B\,[гс]}{10^4}}{4\pi\cdot 10^{-7}\dfrac{H\,[э]\cdot 10^3}{4\pi}} = \frac{B\,[гс]}{H\,[э]}, \qquad (179)$$

так как

$$1\ вб/м^2 = 10^4\ гс;\quad 1\ а/м = \frac{4\pi}{10^3}\ э = 0{,}01256\ э.$$

Магнитную проницаемость μ'_a при $H \approx 0$ называют начальной проницаемостью, определяя ее величину при очень слабых полях порядка 0,001 *э*. Наибольшее значение магнитной проницаемости называется максимальной проницаемостью и обозначается $\mu'_{макс}$. При сильных полях в области насыщения магнитная проницаемость μ' стремится к единице.

Характеристикой ферромагнетиков в переменных магнитных полях служит величина динамической магнитной проницаемости $\mu'_{\sim}$, представляющая собой отношение амплитудного значения

индукции к амплитудному значению напряженности магнитного поля:

$$\mu'_{\sim} = \frac{B_m}{H_m}. \qquad (180)$$

С увеличением частоты переменного поля динамическая магнитная проницаемость уменьшается (рис. 191) из-за инерционности магнитных процессов.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от температуры, как показано на рис. 192, переходя через максимум при температурах, близких к точке Кюри. Для чистого железа точка Кюри составляет 768° С, для никеля 358° С, для кобальта 1131° С. При температурах выше точки Кюри области спон-

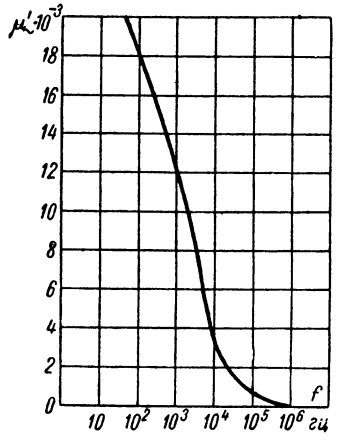


Рис. 191. Зависимость динамической магнитной проницаемости $\mu'_{\sim}$ пермаллоя от частоты в слабом поле ($H = 0{,}01$ э).

Рис. 192. Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от температуры.

танного намагничивания нарушаются тепловым движением, и материал перестает быть ферромагнитным.

Для характеристики изменения магнитной проницаемости с изменением температуры пользуются величиной температурного коэффициента магнитной проницаемости:

$$\alpha_{\mu'} = \frac{1}{\mu'_t} \cdot \frac{d\mu'}{dt} \; [град^{-1}], \qquad (181)$$

определяемого так же, как и для других величин (см., например, § 4).

Если производить намагничивание ферромагнетика во внешнем магнитном поле, а затем, начиная с какой-либо точки основной кривой намагничивания, уменьшать напряженность поля, то величина индукции будет также уменьшаться, но не по основной кривой, а более медленно, вследствие явления гистерезиса (отставания). При увеличении поля противоположного направления образец может быть размагничен или перемагничен, а при новой перемене направления магнитного поля индукция снова может вернуться в исходную точку,

характеризующую состояние намагничивания образца, т. е. будет описана кривая, представляющая собой петлю гистерезисного цикла перемагничивания.

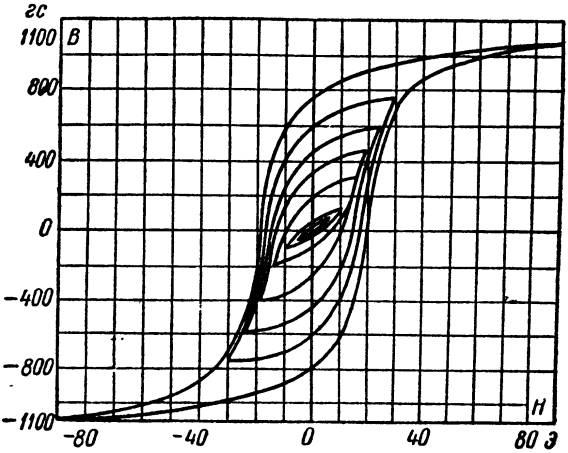


Рис. 193. Гистерезисные петли при различных предельных значениях величины напряженности внешнего магнитного поля.

В зависимости от величины напряженности внешнего магнитного поля можно получить целое семейство петель гистерезиса, как это показано на рис. 193. Выберем из этих циклов предельный цикл, при котором достигается намагничивание материала до насыщения $B_{макс}$ (рис. 194).

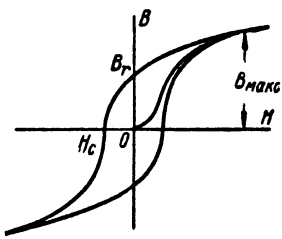


Рис. 194. Начальная кривая намагничивания и предельная петля гистерезиса для ферромагнитного материала.

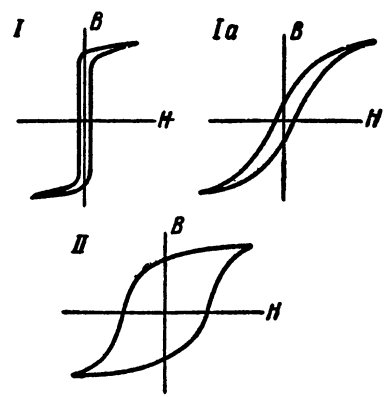


Рис. 195. Петли гистерезиса для магнитномягких материалов (*I*, *I,а*) и для магнитнотвердых материалов *II*.

Значение B при $H=0$ в процессе размагничивания образца, намагниченного до насыщения, называется остаточной индукцией B_r.

Для того чтобы уменьшить индукцию от значения B_r до нуля, необходимо приложить обратно направленную напряженность поля H_c, называемую задерживающей (коэрцитивной) силой.

Материалы с малым значением H_c и большой величиной магнитной проницаемости называются магнитномягкими.

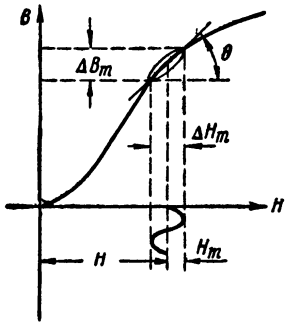


Рис. 196. Пояснение к определению обратимой магнитной проницаемости.

Материалы с большой коэрцитивной силой и меньшей проницаемостью называют магнитнотвердыми.

На рис. 195 приведены типичные петли гистерезиса для магнитномягких и магнитнотвердых материалов.

При использовании ферромагнитных материалов одновременно в постоянном и переменном магнитных полях пользуются величиной обратимой или реверсивной магнитной проницаемости μ'_r.

Если в любой точке кривой намагничивания начать циклическое перемагничивание при малой амплитуде H_m переменного поля, то мы получим маленький частный гистерезисный цикл (рис. 196).

Обратимая проницаемость определяется по тангенсу угла наклона прямой, соединяющей вершины частного цикла, к оси H при условии, что постоянное поле $H \gg H_m$:

$$\mu'_r = \operatorname{tg}\theta = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m}. \qquad (182)$$

Реверсивная магнитная проницаемость уменьшается при росте величины постоянного смещающего поля H.

Заметное влияние на магнитные свойства ферромагнетиков оказывают упругие изменения их размеров. При наличии отрицательной магнитострикции в данном материале и внешних растягивающих напряжениях наблюдается понижение проницаемости. Так, под действием растягивающего напряжения магнитную проницаемость никеля можно довести до очень низкого значения. При положительной магнитострикции магнитная проницаемость под действием растягивающих напряжений возрастает.

Внутренние напряжения в кристаллической решетке ферромагнетика препятствуют при намагничивании росту доменов и ориентации магнитных моментов их в направлении поля. С увеличением внутренних напряжений магнитная проницаемость уменьшается, а коэрцитивная сила возрастает. Такие напряжения возникают в условиях холодной деформации при прокатке, ковке, протяжке, изгибании и т. п. При этом отдельные кристаллы дробятся, вытягиваются, вследствие чего возникает сложная система внутренних напряжений.

Для восстановления первоначальных магнитных свойств магнитномягкие материалы подвергают отжигу, который снимает внутренние напряжения и вызывает рекристаллизацию зерен.

Магнитные свойства зависят от величины зерна. Поверхностные слои зерен, вследствие искажения строения кристаллов, характеризуются повышенной коэрцитивной силой. В случае мелкозернистого строения суммарная удельная поверхность (на единицу объема) зерен больше, чем при крупнозернистом строении; поэтому в материале, состоящем из мелких зерен, влияние поверхностных искажений слоев сказывается сильнее, и он обладает большей коэрцитивной силой.

Внутренние напряжения нередко связаны с наличием в материале различных загрязнений, например кислорода в чистом железе, примесей или присадок кобальта, хрома, вольфрама. Используя примеси, усложняющие кристаллическую решетку, вводя технологическую операцию закалки, а иногда добиваясь ориентации структуры доменов в магнитном поле, получают магнитнотвердые материалы.

При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда возникают потери энергии, приводящие к нагреву. Эти потери обусловлены потерями на гистерезис и динамическими потерями. Динамические потери вызываются прежде всего вихревыми токами, индуктированными в массе магнитного материала, и частично так называемым магнитным последействием, или магнитной вязкостью. Потери на вихревые токи зависят от электросопротивления ферромагнетика. Чем выше удельное электросопротивление ферромагнетика, тем меньше потери на вихревые токи.

Магнитное последействие особенно заметно проявляется в магнитномягких материалах в области слабых полей.

Потери на гистерезис для каждого материала могут быть определены по площади петли гистерезиса с учетом ее масштаба и частоты тока. Для вычисления потерь на гистерезис за один цикл в единице объема вещества была предложена следующая эмпирическая формула:

$$p_h = \eta B_{\text{макс}}^n, \tag{183}$$

где η — коэффициент, зависящий от материала;

$B_{\text{макс}}$ — максимальная индукция, достигаемая в течение цикла;

n — показатель степени в пределах от 1,6 до 3.

Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена выражением

$$p_h = \eta f B_{\text{макс}}^n V, \tag{184}$$

где f — частота тока;

V — объем ферромагнетика.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_f = \xi f^2 B_{\text{макс}}^2 V, \tag{185}$$

где ξ — коэффициент, зависящий от материала ферромагнетика (в частности, от удельного электросопротивления) и его формы. Остальные величины те же, что и в формуле (184).

Поскольку величина P_f зависит от второй степени частоты, а величина P_h от первой степени, при высоких частотах приходится учитывать в первую очередь величину P_f, т. е. потери на вихревые токи.

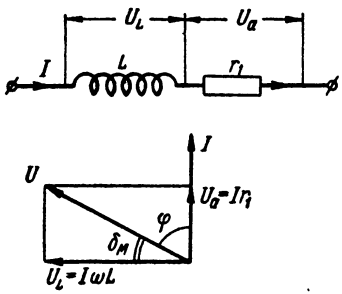


Рис. 197. Эквивалентная схема и векторная диаграмма катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником.

Потери, связанные с магнитным последействием, необходимо учитывать при использовании ферромагнетиков для работы в импульсных режимах.

В радиоэлектронике ферромагнетики используются большей частью в высокочастотных полях невысокой напряженности. При этом рассеяние мощности в ряде случаев оценивают тангенсом угла магнитных потерь.

Тороидальная катушка индуктивности с сердечником из ферромагнитного материала, собственной емкостью и сопротивлением обмотки которой можно пренебречь, может быть представлена в виде схемы, состоящей из последовательно соединенной индуктивности L с сопротивлением r_1, эквивалентным всем видам потерь мощности в ферромагнетике (рис. 197); для этого случая из векторной диаграммы получим:

$$\operatorname{tg}\delta_м = \frac{r_1}{\omega L}. \qquad (186)$$

Пользуясь представлениями, изложенными в § 2, можно написать

$$\operatorname{tg}\delta_м = \frac{\mu''}{\mu'}. \qquad (187)$$

Величину μ'' иногда используют для оценки магнитных потерь.

В диапазоне сверхвысоких частот, при одновременном воздействии на материал взаимно перпендикулярных постоянного и переменного магнитных полей, у ряда материалов обнаруживается максимум $\operatorname{tg}\delta_м$, связанный с явлением резонанса при совпадении частоты переменного поля с частотой прецессионного вращения электронных орбит вокруг вектора напряженности постоянного поля.

При изучении магнитных материалов, применяющихся в радиоэлектронике, их удобно подразделить на следующие группы:

1) магнитномягкие материалы для низких частот;
2) магнитномягкие высокочастотные ферромагнетики;
3) магнитнотвердые материалы.

§ 36. Магнитномягкие материалы для низких частот

Магнитномягкие материалы, которые обладают высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис, используются в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов, в измерительных приборах и в ряде других случаев, когда необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции.

Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах используют магнитномягкие материалы с большим удельным электросопротивлением, обычно применяя магнитопроводы, собранные из отдельных изолированных друг от друга тонких листов.

Советская радиопромышленность применяет целый ряд магнитномягких материалов отечественного изготовления для самого различного назначения.

Технически чистое железо обычно содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Вследствие сравнительно низкого удельного электросопротивления технически чистое железо используется довольно редко, в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока.

Обычное технически чистое железо изготовляется рафинированием чугуна в мартеновских печах, бессемеровских или томасовских конвертерах. Технически чистое железо с суммарным содержанием примесей до 0,08—0,1% применяется в радиотехнике под устаревшим названием „армко-железо".

Особо чистое железо, содержащее сравнительно ничтожное количество примесей (менее 0,05%), может быть получено двумя сложными способами.

1. Электролитическое железо изготовляют путем электролиза раствора сернокислого или хлористого железа, причем анодом служит чистое железо, а катодом — пластина мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщина слоя 4—6 *мм*) после тщательной промывки снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах, после чего его подвергают вакуумному отжигу или переплавляют в вакууме.

2. Карбонильное железо получают посредством термического разложения пентакарбонила железа согласно следующему уравнению:

$$Fe(CO)_5 = Fe + 5CO.$$

Пентакарбонил железа представляет собой продукт воздействия окиси углерода на железо при температуре около 200° С и давлении примерно 150 *ат*. Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка; оно совершенно свободно от кремния, фосфора и серы, но содержит углерод.

В табл. 78 приведены магнитные свойства различных марок чистого железа с указанием содержания в них примесей. На рис. 189 показаны кривые намагничивания для трех сортов чистого железа.

Таблица 78

Состав и магнитные свойства железа разных марок

Наименование материала	Содержание примесей, %		Магнитные свойства		
			проницаемость		коэрцитивная сила H_c
	углерод	кислород	начальная μ'_a	максимальная $\mu'_{макс}$	э
Технически чистое железо	0,02	0,06	250	7 000	0,8
Электролитическое железо	0,02	0,01	600	15 000	0,35
Карбонильное железо	0,005	0,005	3 300	21 000	0,08
Переплавленное в вакууме электролитическое железо	0,01	—	—	61 000	0,09
Железо, обработанное в водороде	0,005	0,003	6 000	200 000	0,04
Железо, обработанное в водороде особо тщательно	—	—	20 000	340 000	0,03
Монокристалл чистейшего железа, отожженный в водороде особо тщательно	—	—	—	1 430 000	0,015

Листовая электротехническая сталь является основным магнитномягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния достигается повышение удельного электросопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи.

Кроме того, присутствие в стали кремния способствует выделению углерода в виде графита, а также почти полному раскислению стали. Это приводит к увеличению μ'_a, уменьшению H_c и к снижению потерь на гистерезис.

Сталь, содержащая до 4% кремния, обладает достаточными механическими свойствами, а при наличии выше 5% кремния она становится очень хрупкой. Путем комбинированной горячей и холодной прокатки кремнистой стали и особой термической обработки можно изготовить текстурованную сталь крупнокристаллического строения, причем микрокристаллы оказываются ориентированными осями наиболее легкого намагничивания параллельно направлению прокатки. Магнитные свойства такой стали в направлении прокатки значительно выше, чем стали, не подвергавшейся подобной обработке.

Листовая электротехническая сталь, в соответствии с ГОСТ 802-58, подразделяется на следующие марки:

Э11, Э12, Э13;
Э21, Э22;
Э31, Э32;
Э41, Э42, Э43, Э43А, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48;
Э310, Э320, Э330, Э330А, Э340, Э370, Э380;
Э1100, Э1200, Э1300, Э3100, Э3100, Э3200.

Первая цифра марки обозначает степень легирования стали кремнием, в соответствии с чем снижается плотность стали и возрастает ее удельное электросопротивление, как это показано в табл. 79.

Таблица 79

Плотность и удельное электросопротивление электротехнической стали в зависимости от содержания кремния

Первая цифра марки	Степень легирования стали кремнием	Содержание кремния, %	Плотность, *г/см³*	Удельное электросопротивление, *ом·мм²/м*
1	Слаболегированная	0,8 — 1,8	7,80	0,25
2	Среднелегированная	1,8 — 2,8	7,75	0,40
3	Повышеннолегированная	2,8 — 3,8*	7,65	0,50
4	Высоколегированная	3,8 — 4,8	7,55	0,60

* Для холоднокатаной стали 2,8—3,5%.

Вторая цифра марки характеризует сталь в отношении ее электрических и магнитных свойств. Так, при цифрах 1, 2, 3 гарантируются определенные удельные потери стали при перемагничивании (при частоте 50 *гц*) и магнитная индукция в сильных полях. Буква А после цифры обозначает особенно низкие удельные потери. Цифра 4 свидетельствует о том, что в данной стали нормируются потери при перемагничивании на частоте 400 *гц* и магнитная индукция в полях средней напряженности. Стали, в марках которых имеются цифры 5 и 6, предназначены для работы в слабых полях от 0,002 до 0,008 *а/см*,* и в них гарантируется величина μ'_a. Цифры 7 и 8 указывают, что определяющим свойством стали является магнитная проницаемость в полях средней напряженности от 0,03 до 10 *а/см*. Наконец, наличие третьей цифры (0) обозначает, что сталь холоднокатаная (текстурованная); третья и четвертая цифры (00) приняты для обозначения холоднокатаной малотекстурованной стали.

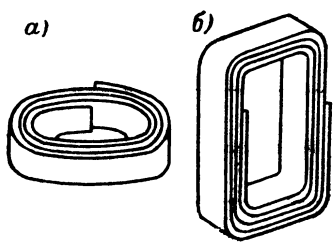


Рис. 198. Ленточные сердечники: *а* — тороидальный тип; *б* — овальный тип.

Высоколегированная сталь находит применение главным образом для изготовления сердечников трансформаторов.

Текстурованная сталь анизотропна и используется для сердечников трансформаторов, изготовляемых по способу „намотки" (рис. 198). Применение этой стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их вес и габаритные размеры на 20—25%, а в радиотрансформаторах — на 40%.

Наиболее употребительные размеры листов электротехнической стали указаны в табл. 80.

* $H\ [э] = 0{,}4\ \pi H\ [а/см]$.

Таблица 80

Размеры листов электротехнической стали

Размеры листов	Единица измерения	Наиболее употребительные номиналы
Толщина	*мм*	0,1; 0,2; 0,35; 0,5;
Ширина	*м*	0,24; 0,6; 0,7; 0,75; 0,86; 1
Длина	»	0,72; 1,2; 1,34; 1,5; 1,72; 2

Стандарт устанавливает для различных марок электротехнической стали определенные электрические и магнитные свойства, к которым относятся:

1) магнитная индукция, обозначаемая буквой В с цифрой, определяющей соответствующую напряженность магнитного поля в *а/см*;

2) суммарные удельные потери мощности на переменном токе в ваттах на килограмм стали (отдельные листы стали изолированы друг от друга), находящейся в переменном магнитном поле, обозначаемые буквой Р с числом в виде дроби, числитель которой представляет амплитудное значение магнитной индукции в килогауссах, а знаменатель — частоту в герцах.

Таблица 81

Предельные значения магнитной индукции и удельных потерь электротехнической стали

Марка стали	Толщина стали, *мм*	В25—В300, *кгс*, не менее	Р10/50—Р15/50 *вт/кг*, не более	В5—В25, *кгс*, не менее	Р7,5/400—Р10/400, *вт/кг*, не более
Э11—Э43А (горячекатаная)	0,35—1	14,4—20	0,9—13,4	—	—
Э1100—Э3200	0,5	14,8—20	1,5—7,5	—	—
Э310—Э330А	0,35—0,5	17,5—20	0,5—2,45	—	—
Э44 и Э340	0,1—0,35	—	—	11,9—17	6—19

В табл. 81 приведены предельные значения индукции и удельных потерь для некоторых марок электротехнической стали.

Магнитная индукция других марок электротехнической стали указана в табл. 82.

Зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля для сталей Э44 и Э48 приведены на рис. 199.

Железо-никелевые сплавы, называемые пермаллоями, обладают весьма большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых полей. Это связано с отсутствием у них анизотропии и магнитострикции. В соответствии с техническими условиями

(ЧМТУ 5010-55) они могут быть подразделены на высоко- и низконикелевые пермаллои. Высоконикелевые пермаллои содержат 72—80% никеля, а низконикелевые — 40—50% никеля.

Таблица 82

Предельные значения магнитной индукции некоторых марок электротехнической стали

Марка стали	Толщина стали, *мм*	B0,002—B0,008, *гс*, не менее	B0,1—B10, *кгс*, не менее
Э45 и Э46	0,2—0,35	1,2—8,8	—
Э47 и Э48	0,2—0,35	—	0,3—13
Э370 и Э380	0,2—0,5	—	1,4—17

Введение в состав пермаллоя примесей молибдена, хрома, кремния и марганца повышает его удельное электросопротивление. Примесь молибдена способствует также уменьшению чувствительности пермаллоя к деформациям, а примеси меди приводят к повышению постоянства μ' в узких интервалах напряженности поля.

Высоконикелевый пермаллой различных марок применяется для изготовления сердечников малогабаритных дросселей, слаботочных малогабаритных трансформаторов звукового диапазона и импульсных трансформаторов, а также в магнитных усилителях.

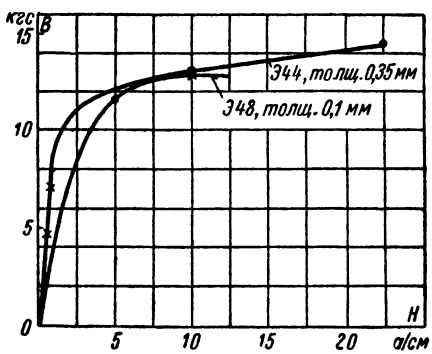


Рис. 199. Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля для электротехнической стали.

Низконикелевый пермаллой обладает индукцией насыщения, почти вдвое большей, чем индукция высоконикелевого, что позволяет применять низконикелевые сплавы в силовых трансформаторах, дросселях и других приборах, где требуется высокая концентрация магнитного потока. Пермаллои с прямоугольной петлей гистерезиса могут использоваться для сердечников магнитных усилителей, переключающих устройств, выпрямительных установок и для элементов счетно-решающих машин.

Пермаллои очень чувствительны к механическим воздействиям.

Свойства пермаллоев приведены в табл. 83.

С увеличением частоты высокие значения магнитной проницаемости пермаллоев падают, вследствие возникновения в них заметных вихревых токов из-за не очень большого удельного электросопротивления. Уменьшение индукции с увеличением частоты при одной

Основные свойства высокопроницаемых сплавов (по ЧМТУ 5010-55)

Таблица 83

Наименование сплава	Характеристика сплава	Толщина листа, *мм*	μ'_a	$\mu'_{макс}$	H_c, *э*	$B_{макс}$, *кгс*	ρ, *ом* × *мм²/м*
Высоконикелевые пермаллои:							
79НМ	Сплав с высокой магнитной проницаемостью и повышенным удельным электросопротивлением	0,35—2,50	22 000	120 000	0,02	7,5	0,55
		0,02—0,04	14 000	60 000	0,06		
80НХС	Сплав с особо высокой проницаемостью и высоким удельным электросопротивлением	1,20—2,50	25 000	150 000	0,01	7	0,63
		0,02—0,04	16 000	70 000	0,05		
79НМА	Сплав с наивысшей магнитной проницаемостью и повышенным удельным электросопротивлением	0,80—1,00	50 000	300 000	0,01	7,5	0,56
		0,02—0,04	18 000	80 000	0,06		
Низконикелевые пермаллои							
45Н	Сплав с повышенной проницаемостью и наивысшим значением индукции насыщения для Fe—Ni сплавов	0,35—2,50	2 500	23 000	0,20	15	0,45
		0,05—0,09	1 700	16 000	0,30		
50Н	То же	1,10—2,50	2 500	25 000	0,18	15	0,45
		0,05—0,09	1 900	19 000	0,25		
50НП	Текстурованный сплав с прямоугольной петлей гистерезиса и наивысшим значением индукции насыщения	0,05	1 000	40 000	0,30	15	0,45
		0,02	900	30 000	0,45		
65НП	Текстурованный сплав с прямоугольной петлей гистерезиса и высокой индукцией насыщения	0,05—0,10	400	100 000	0,15	13	0,25
		0,02—0,04	400	35 000	0,20		
38НС	Сплав с повышенной проницаемостью, высоким удельным электросопротивлением и малым магнитным последействием	0,10—0,19	3 000	25 000	0,15	9,5	0,9
		0,02—0,04	2 500	20 000	0,15		
42НС	То же	0,10—0,19	3 000	25 000	0,10	10	0,85
		0,02—0,04	2 500	20 000	0,10		
50НХС	То же	0,35—1,00	3 200	30 000	0,12	10	0,9
		0,02—0,04	1 500	12 000	0,30		
Альсифер	Хрупкий сплав с высокой проницаемостью и высоким удельным электросопротивлением	—	20 000	117 000	0,022	11	0,81

Примечания. 1. Свойства сплавов 79НМ, 80НХС, 79НМА, 45Н, 50Н, 38НС, 42НС, 50НХС даны для максимальных и минимальных толщин листов, выпускаемых промышленностью. 2. В маркировке сплавов „пермаллой" цифра соответствует процентному содержанию никеля, буквы М, Х, С, А соответствуют основным легирующим компонентам — молибдену, хрому, кремнию, алюминию, а буква П — сплавам с прямоугольной петлей гистерезиса.

и той же напряженности внешнего поля соответствует убыванию динамической магнитной проницаемости, показанному на рис. 191.

Сплавы железа с кремнием и алюминием (тройные сплавы Al — Si — Fe) называются альсиферами. Оптимальный состав альсифера следующий: 9,5% Si, 5,6% Al, остальное — Fe. Такой сплав отличается твердостью и хрупкостью, но может быть изготовлен в виде фасонных отливок.

Свойства альсифера указаны в табл. 83.

Изделия из альсифера — магнитные экраны, корпуса приборов и т. д. — изготовляют методом литья с толщиной стенок не менее 2—3 *мм*, ввиду хрупкости сплава. Эта особенность ограничивает применение данного материала.

Благодаря хрупкости альсифера его можно размалывать в порошок и использовать наряду с карбонильным железом для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

В особую подгруппу выделяют магнитномягкие материалы, применение которых основано на присущих им тех или иных особенностях магнитных свойств, определяемых структурой и составом. К таким материалам можно отнести:

1) сплавы, отличающиеся незначительным изменением магнитной проницаемости при изменении напряженности поля;

2) сплавы с резкой зависимостью магнитной проницаемости от температуры:

3) сплавы с высокой магнитострикцией;

4) сплавы с особенно высокой индукцией насыщения.

К первым относится сплав, получивший название перминвар. Перминвар представляет собой тройной сплав Fe — Ni — Co, содержание которых соответственно составляет 25, 45 и 30%. Этот сплав подвергают отжигу при температуре 1000° С, после чего выдерживают при 400 — 500° С и медленно охлаждают. Перминвар имеет небольшую коэрцитивную силу; начальная магнитная проницаемость его равна 300 и сохраняет постоянное значение в интервале напряженности поля до 3 *э* при индукции 1000 *гс*. Перминвар недостаточно стабилен в магнитном отношении, он чувствителен к влиянию температуры и механическим напряжениям.

Более удовлетворительной стабильностью магнитной проницаемости отличается сплав, именуемый изоперм, в состав которого входят железо, никель, алюминий или медь. Изоперм имеет магнитную проницаемость 30 — 80, которая мало изменяется в полях до напряженности в несколько эрстед.

Ко вторым относятся термомагнитные сплавы на основе Ni— Cu, Fe — Ni и Fe —Ni — Cr. Эти сплавы применяются для компенсации температурной погрешности в установках, вызываемой изменением индукции постоянных магнитов или электросопротивления проводов в магнитоэлектрических приборах по сравнению с теми значениями, при которых производилась градуировка.

Для достижения резкой температурной зависимости магнитной проницаемости используется свойство ферромагнетиков снижать индукцию с ростом температуры вблизи точки Кюри. Для этих ферромагнетиков точка Кюри лежит между 0 и 100° С в зависимости от добавок легирующих элементов. Сплав Ni — Cu при содержании 30% Cu может компенсировать погрешности в пределах температуры от + 20 до + 80° С (рис. 200), а при содержании 40% Cu — от — 50° С до + 10° С.

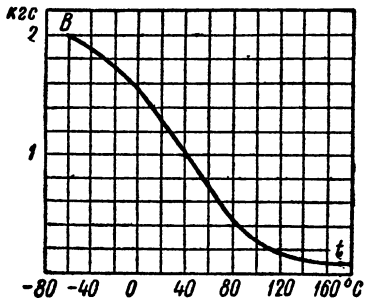


Рис. 200. Температурная зависимость индукции термомагнитного сплава с 30% Cu в магнитном поле напряженностью 100 э.

К третьим, т. е. сплавам с высокой магнитострикцией, относятся сплавы Fe — Cr, Fe — Co и Fe — Al. Такие сплавы находят применение в виде сердечников генераторов акустических колебаний при звуковых и ультразвуковых частотах. Магнитострикция этих сплавов имеет положительный знак, и $\Delta l/l$ колеблется в пределах $(10 \div 70) \cdot 10^{-6}$.

В качестве материала, пригодного для указанной цели, может быть также использован весьма чистый никель (в тонких листах), обладающий большой отрицательной магнитострикцией (см. рис. 188).

К четвертым относятся железо-кобальтовые сплавы, обладающие особенно высокой индукцией насыщения — до 24 000 *гс*, т. е. большей, чем у всех известных ферромагнетиков; электросопротивление таких сплавов невелико.

Сплавы, содержащие от 50 до 70% кобальта, называются пермендюрами. Они могут применяться вследствие их высокой стоимости только в специальной аппаратуре, в частности в динамических репродукторах, осциллографах, телефонных мембранах и т. д.

§ 37. Магнитномягкие высокочастотные ферромагнетики

Высокочастотные ферромагнетики предназначаются для изготовления магнитных деталей, применяемых в полях высокой частоты. Они подразделяются на магнитодиэлектрики и ферриты. Кроме того, при высоких частотах могут применяться тонколистовые рулонные холоднокатаные электротехнические стали и пермаллои.

Толщина сталей достигает 25 — 30 *мкм*, а пермаллой, как механически более мягкий сплав, может быть получен толщиной до 2 — 3 *мкм*. Основные магнитные свойства таких тонких материалов близки к свойствам материалов больших толщин, однако они имеют повышенную стоимость, а технология сборки магнитных цепей из них весьма сложна.

Магнитодиэлектрики

Магнитодиэлектрики получают путем прессования порошкообразного ферромагнетика с изолирующей органической или неорганической связкой. В качестве основы применяют карбонильное железо, пермаллой, альсифер, магнетит. Изолирующей связкой служат фенолоформальдегидные смолы, полистирол, стекло и др. Основа должна обладать высокими магнитными свойствами, а связка — способностью образовывать между зернами сплошную, без разрыва, изоляционную пленку. Такая пленка должна быть, по возможности, одинаковой толщины и прочно связывать зерна между собой.

Магнитодиэлектрик должен иметь малые потери и отличаться достаточной стабильностью магнитной проницаемости во времени и при колебаниях температуры.

Суммарные потери энергии в магнитодиэлектрике определяются потерями на гистерезис, последействие, на вихревые токи и диэлектрическими потерями в изоляционной связке:

$$P = P_h + P_п + P_f + P_д. \qquad (188)$$

Эти потери вызывают увеличение активного электросопротивления катушки индуктивности с сердечником из магнитодиэлектрика. Величина этого электросопротивления слагается из величины электросопротивления обмотки и электросопротивления, обусловленного потерями в магнитодиэлектрике, и может быть выражена следующей формулой:

$$r = r_h + r_п + r_f + r_д + r_м, \qquad (189)$$

где $r_h + r_п + r_f + r_д$ — суммарное электросопротивление, эквивалентное потерям в магнитодиэлектрике;

$r_м$ — электросопротивление, эквивалентное потерям в меди обмотки катушки.

На общей величине потерь магнитодиэлектрика весьма сильно сказываются размеры частиц порошка ферромагнетика и характер изоляции между зернами.

Для уменьшения потерь, особенно обусловленных вихревыми токами, необходимо применять возможно более мелкий порошок ферромагнетика с тщательной изоляцией отдельных зерен.

Магнитодиэлектрики характеризуют эффективной магнитной проницаемостью, которая всегда меньше μ' ферромагнетика, составляющего основу данного магнитодиэлектрика. Это объясняется двумя причинами — наличием неферромагнитной связки и тем, что проницаемость магнитодиэлектриков принято измерять на готовых сердечниках, а не на тороидах.

Высокочастотные ферромагнетики в виде прессованных сердечников применяются в катушках индуктивности фильтров, генераторов, частотомеров, контуров радиоприемников и т. д. Такие катушки

должны иметь малый объем при высокой индуктивности и обладать большой добротностью:

$$Q = \frac{\omega L}{r}, \qquad (190)$$

где L — индуктивность;

ω — угловая частота;

r — активное электросопротивление катушки.

Введение сердечника в катушку увеличивает индуктивность ее в большей мере, чем возрастает активное электросопротивление, зависящее от потерь в сердечнике, в связи с чем добротность катушки повышается.

В табл. 84 приведены сравнительные данные катушки без сердечника и катушки той же индуктивности с сердечником из магнитодиэлектрика.

Таблица 84

Изменение характеристик катушки индуктивности 1000 *мкгн* при использовании магнитодиэлектриков

Свойства	Единица измерения	Катушка без сердечника	Катушка с сердечником из карбонильного железа	Эффект введения сердечника из карбонильного железа в катушку
Объем	$см^3$	26	3,5	Экономия 87% объема
Вес	*Г*	24,1	9,2	То же, 62% веса
Длина провода . .	*мм*	1800	720	„ „ 60% провода

Катушки индуктивности с сердечником из магнитодиэлектрика могут обладать переменной индуктивностью, обеспечивающей возможность настройки контуров посредством перемещения подвижных сердечников (подстроечников).

Изделия из магнитодиэлектриков стареют, т. е. изменяют свои характеристики во времени. Стабильность прессованного сердечника зависит от свойств порошкообразного ферромагнетика, качества связки и от воздействия среды, в частности влажности воздуха и температуры.

Наибольшее распространение получили магнитодиэлектрики, изготовляемые путем прессования из карбонильного железа, частицы которого имеют особенно малые размеры и округлую форму, и из размолотого альсифера.

Сердечники на основе карбонильного железа отличаются достаточно высокой стабильностью, малыми потерями, положительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости и могут быть использованы в широком диапазоне частот.

Особенностью сердечников из альсифера является наличие у них отрицательного температурного коэффициента магнитной проницаемости. Это позволяет создавать магнитодиэлектрики из смеси карбонильного железа и альсифера с необходимой величиной и знаком температурного коэффициента магнитной проницаемости.

На рис. 201 изображены формы сердечников, изготовленных из высокочастотных ферромагнетиков, применяемых в радиотехнике.

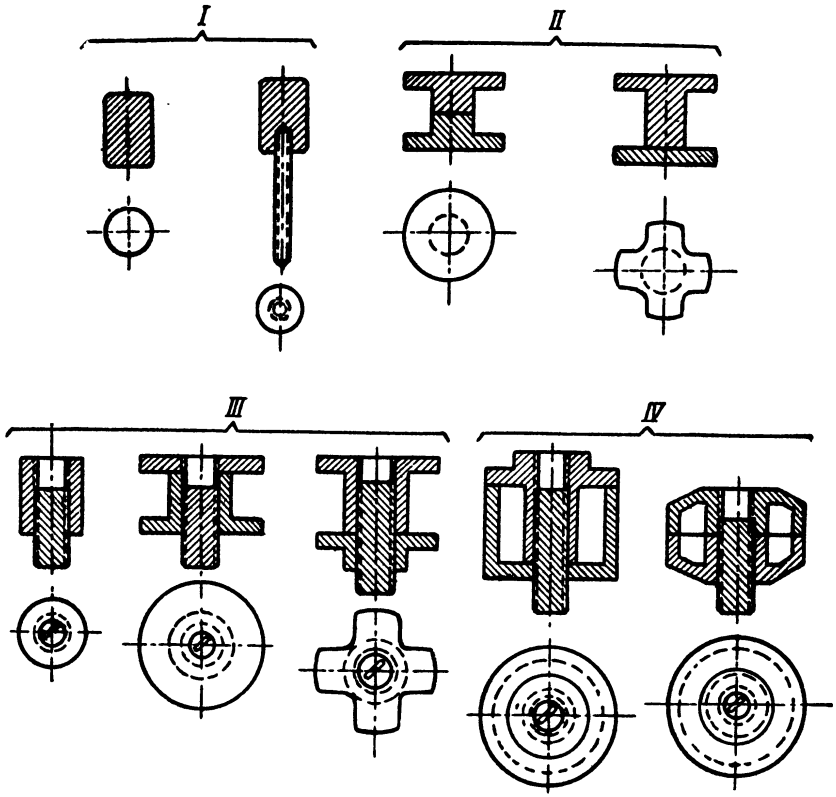


Рис. 201. Сердечники из магнитодиэлектриков, применяемые в радиотехнике: *I* — открытый; *II* и *III* — полузакрытый; *IV* — закрытый (броневой).

В табл. 85 приведены основные обобщенные свойства магнитодиэлектриков из карбонильного железа и альсифера.

Ферриты

Ферриты представляют собой магнитную керамику с незначительной электронной проводимостью, вследствие чего они могут быть отнесены к электронным полупроводникам.

Большая величина удельного электросопротивления, превышающая ρ железа в $10^6 — 10^{11}$ раз, а следовательно, и относительно незначительные потери энергии в области повышенных и высоких частот, наряду с достаточно высокими магнитными свойствами, обеспечивают ферритам самое широкое применение в радиоэлектронике.

Таблица 85

Свойства магнитодиэлектриков

Наименование материала	$\mu'_{эфф}$	$\alpha_{\mu'эфф} \cdot 10^6$, *град*$^{-1}$	Коэффициенты потерь		
			$\frac{\operatorname{tg}\delta_h}{H} \cdot 10^3$	$\frac{\operatorname{tg}\delta_f}{f} \cdot 10^9$	$\operatorname{tg}\delta_п \cdot 10^3$
Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа	7—9	+100	0,4	3	0,4
Магнитодиэлектрики на основе альсифера	20—65	от —200 до —400	1,2—5	12—250	1,2—2
Магнитодиэлектрики сложного состава на основе смеси альсифера с другими ферромагнетиками . .	20—60	от —150 до +50	1,2—5	12—250	1,2—2

Ферриты являются двойными окислами железа и двухвалентных (реже — одновалентных) металлов, соответствующими следующей общей формуле:

$$MeO \cdot Fe_2O_3,$$

где Me — символ двухвалентного металла.

Ферриты имеют кубическую кристаллическую решетку, подобную минеральной шпинели $MgO \cdot Al_2O_3$.

Большинство ферритов, как и природный магнитный железняк (магнетит) $FeO \cdot Fe_2O_3$, обладает магнитными свойствами, однако ферриты $ZnO \cdot Fe_2O_3$ и $CdO \cdot Fe_2O_3$ являются неферромагнитными. Исследования показали, что наличие или отсутствие ферромагнитных свойств определяется кристаллической структурой материалов и, в частности, расположением ионов двухвалентных металлов и железа между ионами кислорода.

На рис. 202 показана элементарная ячейка шпинели с различным расположением катионов.

В случае структуры обычной шпинели, когда в центре кислородных тетраэдров расположены ионы Zn^{++} или Cd^{++}, магнитные свойства отсутствуют. При структуре так называемой обращенной шпинели, когда в центре кислородных тетраэдров расположены ионы Fe^{+++}, материал обладает магнитными свойствами. Ферриты, обладающие наиболее ценными магнитными свойствами и нашедшие техническое применение, представляют, как правило, твердые растворы нескольких простейших соединений, в том числе и неферромагнитных

ферритов. Так, например, общая формула одного из широко распространенных никель-цинковых ферритов имеет вид:

$$m\mathrm{NiO}\cdot\mathrm{Fe_2O_3} + n\mathrm{ZnO}\cdot\mathrm{Fe_2O_3} + p\mathrm{FeO}\cdot\mathrm{Fe_2O_3},$$

где коэффициенты m, n и p определяют количественные соотношения компонентов.

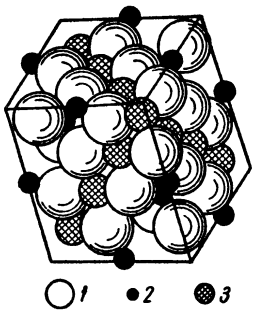


Рис. 202. Элементарная ячейка шпинели:

1 — ионы кислорода; *2* — катионы в тетраэдрических положениях; *3* — катионы в октаэдрических положениях.

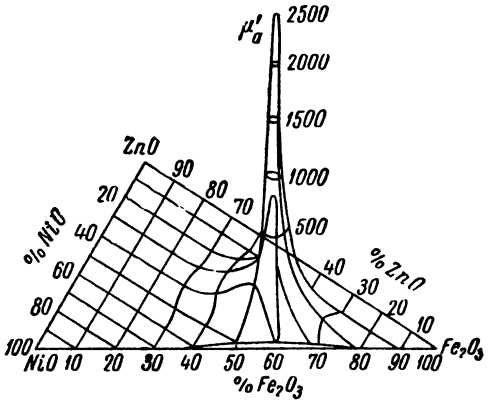


Рис. 203. Зависимость начальной магнитной проницаемости в системе NiO — — ZnO — Fe_2O_3 от состава (температура обжига 1380° С).

Процентный состав компонентов играет существенную роль в достижении тех или иных магнитных свойств материала. На рис. 203 в качестве примера показана зависимость начальной магнитной проницаемости никель-цинкового феррита от его состава. Как видно из этого рисунка, высокие значения μ'_a достигаются в довольно узком участке тройной диаграммы.

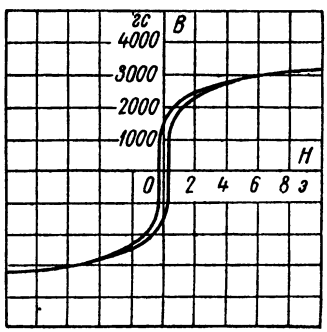


Рис. 204. Гистерезисная петля феррита с высокой магнитной проницаемостью.

Применяющиеся в технике ферриты называют также оксиферами, желая этим подчеркнуть, что они представляют собой сложные оксидные ферромагнетики, что, конечно, более правильно; однако первое название получило большее распространение. В заграничной литературе употребляется также термин „ферроксcуб", подчеркивающий кубическое строение решетки этих материалов.

Технология изготовления ферритов оказывает также очень существенное влияние на окончательные свойства готовых изделий. Процесс производства ферритовых изделий вкратце сводится к следую-

щему. Предварительно приготовляют ферритовый порошок, состоящий из тонко измельченных и тщательно перемешанных обожженных окислов соответствующих металлов. В него добавляют пластификатор — обычно раствор поливинилового спирта, и из полученной массы прессуют под большим давлением изделия требуемой формы. Затем

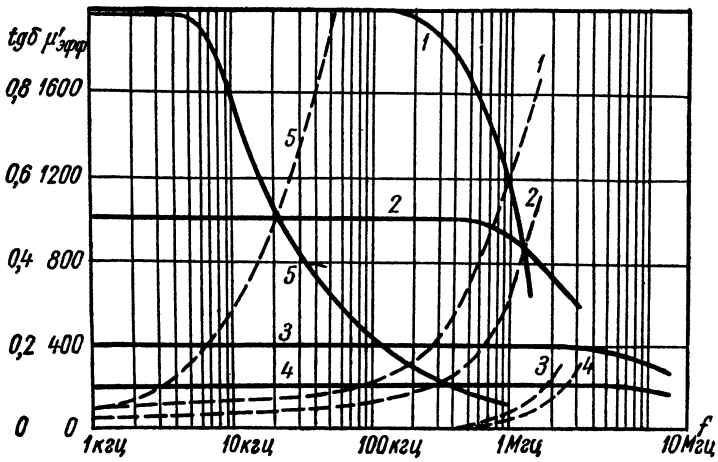


Рис. 205. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные кривые) и тангенса угла потерь (пунктирные кривые) от частоты в слабых полях для никель-цинковых ферритов и сплава 50 НХС:

1 — оксифер-2000; *2* — оксифер-1000; *3* — оксифер-400; *4* — оксифер-200; *5* — железо-никелевый сплав 50 НХС — 0,1 *мм*.

изделия подвергают обжигу при температуре 1100—1400° С. При этом происходит их спекание и образование твердых растворов ферритов. Обжиг должен производиться обязательно в окислительной среде (обычно в воздухе). Присутствие даже небольшого количества водорода в рабочем пространстве печи может вызвать частичное восстановление окислов, что приведет к резкому увеличению потерь в магнитной цепи. Усадка ферритов при обжиге может достигать 20%.

Ферриты являются твердыми и хрупкими материалами, не позволяющими производить обработку резанием и допускающими только шлифовку и полировку.

Ферриты обладают магнитострикцией, причем у различных ферритов этот эффект проявляется по-разному. Так, ферриты с низкой температурой Кюри обладают меньшим магнитострикционным эффектом.

По свойствам и применению ферриты могут быть разделены на следующие группы:

1) магнитномягкие ферриты;
2) ферриты для СВЧ;
3) ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса;

4) магнитнотвердые ферриты (ввиду особых свойств эти ферриты будут рассмотрены в следующем параграфе).

Рассмотрим основные закономерности в свойствах магнитномягких ферритов, использовав для этого характеристики никель-цинковых ферритов.

На рис. 204 приведена гистерезисная петля феррита с высокой магнитной проницаемостью. Как видно из рисунка, этот феррит имеет максимальную индукцию свыше 3000 *гс* и небольшую коэрцитивную силу — порядка 0,2 *э*.

На рис. 205 представлены зависимости магнитной проницаемости и тангенса угла потерь (суммарных — магнитных и диэлектрических) никель-цинковых ферритов различных марок от частоты. Чем выше начальное значение магнитной проницаемости, тем при более низких частотах наблюдается ее снижение. Ферриты с большим значением $\mu'_{эфф}$ обладают и бóльшим значением tg δ, показывающим более быстрый рост с увеличением частоты.

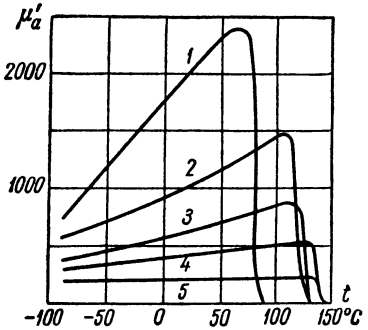


Рис. 206. Зависимость начальной магнитной проницаемости от температуры для Ni — Zn ферритов:

1 — оксифер-2000; *2* — оксифер-1000; *3* — оксифер-600; *4* — оксифер-400; *5* — оксифер-200.

Зависимость магнитной проницаемости никель-цинковых ферритов от температуры приведена на рис. 206. Как видно из представленных здесь кривых, μ'_a повышается с ростом температуры до точки Кюри и затем резко падает. При этом чем выше значение начальной проницаемости, тем ниже будет точка Кюри этого феррита.

Некоторые физические свойста ферритов приведены в табл. 86.

Таблица 86

Физические свойства ферритов

Свойства	Единица измерения	Численное значение
Плотность	*г/см*^{3}	3—5
Удельная теплоемкость . . .	*кал/г · град*	0,17
Удельная теплопроводность	*кал/см · сек · град*	$\sim 10^{-2}$
Температурный коэффициент линейного расширения	*град*$^{-1}$	10^{-5}
Удельное электросопротивление	*ом · см*	$10—10^7$

Ферриты имеют относительно большую диэлектрическую проницаемость, зависящую от частоты и состава ферритов. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает. Так, например, никель-цинковый феррит с начальной проницаемостью $\mu'_a =$

$=200$ на частоте 1 *кгц* имеет $\varepsilon' = 400$, а на частоте 10 *Мгц* диэлектрическая проницаемость его $\varepsilon' = 15$. Наиболее высокое значение ε' присуще марганец-цинковым ферритам, у которых она достигает сотен или тысяч.

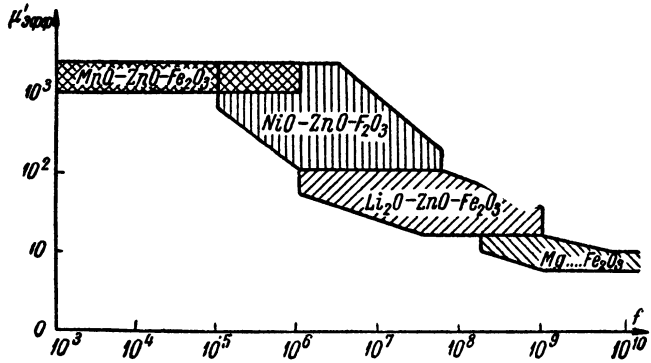


Рис. 207. Ориентировочная схема использования ферритов при различных частотах.

В настоящее время выпускаются в основном следующие группы смешанных магнитномягких ферритов: марганец-цинковые, никель-

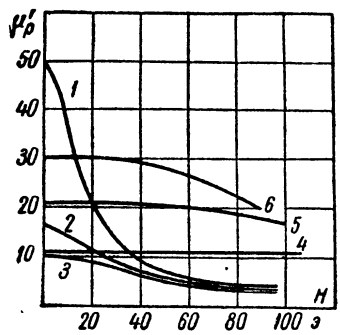


Рис. 208. Обратимая проницаемость оксиферов и типовых магнитодиэлектриков:

1 — оксифер РЧ-50; *2*—оксифер РЧ-12, $\mu'_a = 15$; *3* — оксифер РЧ-12, $\mu'_a = 10$; *4* — карбонильное железо К-12; *5* — альсифер РЧ-22; *6* — альсифер ВЧ-30.

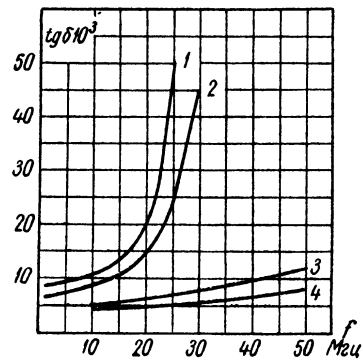


Рис. 209. Зависимость тангенса угла потерь от частоты для оксиферов РЧ при $H_a \approx 5$ *мэ*.

1 — оксифер РЧ-50, $\mu'_a = 65$; *2* — оксифер РЧ-50, $\mu'_a = 45$; *3* — оксифер РЧ-12, $\mu'_a = 15$; *4* — оксифер РЧ-12, $\mu'_a = 10$.

цинковые и литий-цинковые. Эти ферриты применяются в различных частотных диапазонах, которые ориентировочно определяются значениями магнитной проницаемости и потерь (рис. 207).

Магнитномягкие ферриты нашли применение при изготовлении контурных катушек, катушек фильтров, магнитных экранов, сердечников импульсных трансформаторов, трансформаторов развертки телевизоров и т. д.

Ферриты для СВЧ относятся к группе магний-марганцевых ферритов с большим содержанием окиси магния. Они применяются в диапазоне от 500 до 20 000 *Мгц*, проявляя при этом особые свойства. Электромагнитная волна в процессе прохождения ее через феррит может активно взаимодействовать с вращающимися электронами, определяющими магнитные свойства среды. В результате этого взаимодействия происходит поворот плоскости поляризации волн (эффект Фарадея) и некоторые другие явления. Накладывая внешнее поле, можно управлять этими явлениями.

Используя такие свойства ферритов на СВЧ, их применяют для изготовления волноводных управляемых элементов, переключателей, модуляторов и ослабителей сверхвысоких частот.

Для ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса характерны малая разница в величине остаточной индукции и индукции насыщения, а также небольшая величина коэрцитивной силы, то есть их гистерезисная петля имеет вид рис. 195 (1). Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса относятся к системе магний-марганцевых ферритов с небольшим количеством таких окислов, как NiO, ZnO, CaO, CuO, PbO, CdO.

Прямоугольная петля гистерезиса приводит в тому, что данный феррит может находиться практически только в состоянии намагниченности, соответствующем индукции $+B_r$ или $-B_r$. Это позволяет использовать такие ферриты как переключающие элементы с двумя устойчивыми состояниями и как элементы запоминающих устройств электронных счетных машин.

Образцы деталей из ферритов показаны на рис. 210.

§ 38. Магнитнотвердые материалы

Магнитнотвердые материалы отличаются от магнитномягких материалов высокой коэрцитивной силой. Площадь гистерезисной петли магнитнотвердых материалов значительно больше, чем у магнитномягких (см. рис. 195).

Магнитнотвердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов. Характеристикой таких материалов служит максимальная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство. Магнитная проницаемость материалов для постоянных магнитов ниже, чем магнитномягких материалов, причем чем выше коэрцитивная сила, тем меньше магнитная проницаемость.

Магнит в замкнутом состоянии (в виде тороида) не отдает энергию во внешнее пространство. При наличии воздушного зазора между полюсами происходит отдача энергии в пространство, величина которой зависит от длины зазора, причем индукция B_l в промежутке

будет меньше остаточной индукции B_r, вследствие размагничивающего действия полюсов магнита.

Энергия, заключенная в единице объема воздушного зазора, может быть выражена следующим равенством в системе MKSA:

$$W_l = \frac{B_l H_l}{2}, \tag{191}$$

или в системе CGSM:

$$W_l = \frac{B_l H_l}{8\pi}, \tag{192}$$

где H_l — напряженность поля, соответствующая индукции B_l (рис. 211).

Чем меньше длина магнита и чем относительно больше зазор, тем больше размагничивающее поле полюсов и тем меньше B_l.

На рис. 211 представлена кривая размагничивания (четвертая часть петли гистерезиса), а также кривая, выражающая зависимость энергии W_l от величины индукции B_l.

При замкнутом магните $B_l = B_r$, причем энергия равна нулю, так как $H_l = 0$. Если зазор между полюсами очень велик, то энергия при этих условиях также стремится к нулю, так как $B_l = 0$, $H_l = H_c$.

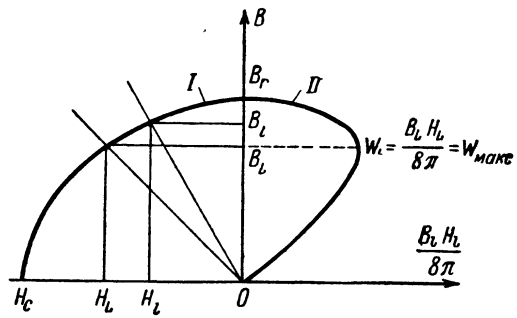


Рис. 211. Кривые размагничивания (*I*) и магнитной энергии в воздушном зазоре (*II*).

При некоторых значениях B_L и H_L энергия достигает максимального значения, что видно из рис. 211.

Значение

$$W_L = \frac{B_L H_L}{8\pi} = W_{макс} \tag{193}$$

определяет наилучшее использование магнита и тем самым является наиболее важной характеристикой качества материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов. Нередко для характеристики таких материалов пользуются произведением ($B_L H_L$), не вводя множителя $\frac{1}{8\pi}$.

Постоянные магниты, как известно, имеют самое широкое применение. Они разнообразны по конструкции и габаритам.

Наиболее простыми и доступными материалами для изготовления постоянных магнитов являются легированные стали с добавками вольфрама, хрома, молибдена, кобальта, закаленные на мартенсит. Составы и свойства таких сталей приведены в табл. 88.

Большую магнитную энергию имеют тройные сплавы Al — Ni — Fe — так называемые сплавы а л ь н и. При добавлении кобальта или кремния в эти сплавы их магнитные свойства повышаются.

Таблица 88

Состав и свойства мартенситных сталей для постоянных магнитов ПО ГОСТ 6862-54

Марка стали	Химический состав, %					Магнитные свойства, (не менее)	
	C	Cr	W	Co	Mo	Остаточная индукция B_r, кгс	Коэрцитивная сила H_c, э
ЕХ	0,95—1,10	1,30—1,60	—	—	—	9,0	58
ЕХ3	0,90—1,10	2,80—3,60	—	—	—	9,5	60
Е7В6	0,68—0,78	0,30—0,50	5,20—6,20	—	—	10,0	62
ЕХ5К5	0,90—1,05	5,50—6,50	—	5,50—6,50	—	8,5	100
ЕХ9К15М	0,90—1,05	8,0—10,0	—	13,5—16,5	1,20—1,70	8,0	170

Сплав альни с добавкой кремния называется альниси, а сплав альни с кобальтом — альнико; сплав с наибольшим содержанием кобальта получил название магнико.

Резко улучшенные магнитные свойства сплава магнико обусловлены не только его составом, но и специальной его обработкой — охлаждением магнитов после отливки в сильном магнитном поле. В отношении магнитных характеристик сплав магнико анизотропен: наилучшие свойства он обнаруживает в том направлении, в котором при охлаждении на него действовало магнитное поле.

Магниты из сплава магнико при равной магнитной энергии в 4 раза легче магнитов из сплава альни и в 22 раза легче, чем магниты из обычной хромистой стали.

Магнитные свойства магнитнотвердых материалов зависят от кристаллографической и магнитной текстур. У всех магнитнотвердых материалов наилучшие магнитные свойства достигаются при значительном искажении решетки.

В табл. 89 приведены состав и свойства сплавов для постоянных магнитов.

Недостатком сплавов типа альни, альнико и магнико является трудность изготовления из них изделий точных размеров, вследствие хрупкости и твердости, допускающих обработку только путем шлифовки. Поэтому мелкие изделия изготовляют методами порошковой металлургии, получая металлокерамические магниты. Изготовление их сводится к прессованию порошка, состоящего из измельченных тонкодисперсных магнитнотвердых сплавов, и к дальнейшему спеканию при высоких температурах по аналогии с процессами обжига керамики. Мелкие детали при такой технологии получаются достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки.

Оксидные магниты получают путем спекания окислов ферромагнитных элементов. Из магнитнотвердых ферритов наиболее известен

Таблица 89

Химический состав, режим термической обработки и магнитные свойства сплавов для постоянных магнитов (ГОСТ 4402-48)

Марка сплава	Химический состав, %**					Режим термической обработки	Магнитные свойства*		
	Ni	Al	Co	Cu	Si		B_r, гс	H_c, э	$\frac{B_L H_L}{8\pi}$, эрг/см³
							не менее		
АН1 (альни 1)	22	11	—	—	—	Закалка при 1200° С	7000	250	28 000
АН2 (альни 2)	24,5	13	—	3,5	—	Закалка при 1200° С и отпуск при 550° С	6000	430	38 000
АН3 (альни 3)	23,5	15,5	—	4,0	—	Нормализация при 1100° С	5000	500	36 000
АНК (альниси)	33	13,5	—	—	1,0	То же 1200° С	4000	750	43 000
АНКо1 (альнико 12)	18	10	12	6,0	—	» » 1250° С	6800	500	55 000
АНКо2 (альнико 15)	20	9	15	4,0	—	» » 1300° С	7500	600	60 000
АНКо3 (альнико 18)	19	10	18	3,0	—	Закалка при 1300° С в магнитном поле (скорость охлаждения 5°/сек до 500° С) и отпуск при 600° С	9000	650	97 000
АНКо4 (альнико 24, магнико)	13,5	9	24	3,0	—	То же	12 300	500	150 000

* Для магнитов из сплавов АНКо3 и АНКо4 указанные магнитные свойства относятся к направлению приложенного магнитного поля при термомагнитной обработке.

** Остальное — железо.

бариевый феррит $BaO \cdot 6Fe_2O_3$ (ферроксдюр). Оксидные магниты обладают наименьшей плотностью при высоких остаточных магнитных свойствах, достигаемых специальной обработкой.

К ковким магнитотвердым материалам относится сплав викаллой, из которого можно изготовлять ленту и проволоку.

Таблица 90

Состав и свойства металлокерамических, оксидных магнитов и викаллоя

Наименование материала	Химический состав, %	Магнитные свойства		
		H_c, э	B_r, гс	$\frac{H_L B_L}{8\pi}$, эрг/см³
Металлокерамический АНКо . . .	50 Fe; 8Al; 15 Ni; 24 Co; 3 Cu	560	10 500	$115 \cdot 10^3$
Оксидный магнит	30 Fe_2O_3; 44 Fe_3O_4; 26Co_2O_3	900	1 600	$20 \cdot 10^3$
Изотропный феррит бария (ферроксдюр)	14 BaO; 86 Fe_2O_3;	1500	2 000	$32 \cdot 10^3$
Анизотропный феррокедюр . .	То же	2 000	3 800	$140 \cdot 10^3$
Викаллой	34 Fe; 52 Co; 14 V	450	10 000	$130 \cdot 10^3$

Свойства металлокерамических оксидных магнитов и викаллоя приведены в табл. 90.

Как видно из табл. 88, 89 и 90, коэрцитивная сила магнитотвердых материалов может доходить до 2000 *э* (анизотропный ферроксдюр), остаточная индукция до 12 300 *гс* (магнико) и максимальная запасенная энергия до 150 000 *эрг/см³* (магнико).

ЛИТЕРАТУРА

1. К. А. Андрианов, Теплостойкие кремнийорганические диэлектрики, Госэнергоиздат, 1957.
2. К. А. Андрианов, Н. П. Богородицкий, Ю. В. Корицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев, Справочник по электротехническим материалам, Госэнергоиздат, т. I, 1959; т. II, 1960.
3. Э. И. Барг, Технология синтетических пластических масс, Госхимиздат, 1954.
4. Н. П. Богородицкий и И. Д. Фридберг, Электрофизические основы высокочастотной керамики, Госэнергоиздат, 1958.
5. А. А. Воробьев и Е. К. Завадовская, Электрическая прочность твердых диэлектриков, Гостехтеоретиздат, 1956.
6. Б. С. Гальперин, Непроволочные сопротивления, Госэнергоиздат, 1958.
7. У. Данлэп, Введение в физику полупроводников, Изд. иностр. лит., 1959.
8. Ф. Е. Евтеев и В. А. Жуков, Технология радиоаппаратуры, Госэнергоиздат, 1952.
9. А. С. Займовский и Л. А. Чудновская, Магнитные материалы, Госэнергоиздат, 1957.
10. А. Ф. Иоффе, Физика полупроводников, Изд. АН СССР, 1957.
11. А. Ф. Иоффе (ред.), Полупроводники в науке и технике, Изд. АН СССР, т. I, 1957; т. II, 1959.
12. Д. М. Казарновский (ред.), Радиотехнические материалы и детали, изд. ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1958.
13. Д. М. Казарновский, Испытание радиотехнических материалов и деталей, Госэнергоиздат, 1953.
14. Ч. Киттель, Введение в физику твердого тела, Гостехтеоретиздат, 1957.
15. П. П. Кобеко, Аморфные вещества. Изд. АН СССР, 1952.
16. В. Коль, Технология материалов для электровакуумных приборов, Госэнергоиздат, 1957.
17. М. М. Котон, Химия органических диэлектриков, Изд. ЛПИ им. М. И. Калинина, 1957.
18. А. З. Пирятинский (ред.), Электроматериалы и радиодетали, Изд. ВКАС, 1958.
19. В. Т. Ренне, Электрические конденсаторы, Госэнергоиздат, 1959.
20. Г. И. Сканави, Физика диэлектриков, Гостехтеоретиздат, т. I, 1949; т. II, 1958.
21. Б. М. Тареев, Основы физики диэлектриков, Изд. ВЗЭИ, 1959.
22. В. В. Усов и А. С. Займовский, Проводниковые, реостатные и контактные материалы, Госэнергоиздат, 1957.
23. А. Р. Хиппель, Диэлектрики и их применение, Госэнергоиздат, 1959.
24. Д. Д. Чегодаев, Фторопласты, Госхимиздат, 1956.
25. В. Шокли, Теория электронных полупроводников, Изд. иностр. лит., 1953.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Азот 24, 28, 46, 97, 103, 268.
Акулова фигуры 317.
Азот 24, 28, 46, 97, 103, 268.
Алмаз 36, 49, 285.
Алюмель 253, 254.
Алюминий 14, 24, 37, 245, 247, 248, 251, 252, 257, 258, 260, 261, 262, 263, 271, 272, 274, 276, 294, 331, 332, 345.
Алюминоксид 70, 92, 124, 134, 198, 199, 202.
Альдрей 262, 263.
Альни 343, 344, 345.
Альнико 343, 344.
Альниси 343.
Альсифер 330, 331, 333, 334, 340.
Аминопласт 154.
Асбест 189.
Асфальт 157.
Ацетилцеллюлоза 87, 179, 181.

Бакелит 87, 139, 149.
Бареттор 264, 268.
Бензилцеллюлоза 179.
Бензол 28, 45, 47, 157, 166, 171.
Бетон 134, 135.
Биметалл 264.
Битум 120, 124, 156, 157, 159, 162.
Бронза 258, 266.
Бумага 76, 87, 93, 94, 124, 136, 163, 171, 176, 181.
— конденсаторная 177.
— пропиточная 178, 183.
— телефонная 178.

Вазелин 136, 156, 157.
Вариконд 222, 223, 224.
Варистор 282, 293, 296.
Викаллой 345, 346.
Винипласт 145, 146
Висмут 25, 36, 245, 248, 271, 272, 294, 301, 311.
Влагопроницаемость 115, 119.
Влажность 70, 105, 114, 115, 116, 118, 122.
Вода 14, 20, 21, 28, 48, 51, 71, 72, 85, 89, 117, 124, 134, 135, 137, 139, 150, 189, 216.
Водород 23, 24, 26, 28, 36, 45, 46, 101, 134, 216, 264, 267, 268.
Водяной пар 46, 74, 96.
Воздух 12, 14, 95, 101, 102, 103, 104, 116, 124, 134, 135.
Волокно 139, 145, 149, 175, 176, 180, 181, 189.
Вольфрам 245, 255, 266, 267, 268, 272, 276, 343.
Воск 70.
Вулканизация 170.
Выпрямитель 298.
— германиевый 302, 303, 305.
— кремниевый 302, 304, 305.
— меднозакисный 299.
— селеновый 301.
Вязкость 84, 123, 323.

Гелий 25, 28, 46, 96.
Германий 14, 24, 283, 285, 302, 303, 304, 308, 313.
Гетинакс 14, 120, 121, 124, 150, 164, 183, 184, 185.
Гигроскопичность 115, 117, 139, 175.
Гистерезис 225, 264, 320, 321, 323.
Глазурь 214.
Глинозем 90, 91, 131, 202.
Глифталь 139.
Глицерин 48, 180, 273.
Графит 36, 278, 279.
Гудрон 157.

Дерево 14.
Дефекты решетки 33, 34, 130.
Диамагнетики 36.
Дивинилбензол 137.
Дипольный момент 27, 28.
Дислокация 34.
Дисперсия 19.
Диэлектрик дипольный 45.
— нейтральный 45.
— несовершенный 17.
— реальный 20.
— совершенный 16, 34.
Диэлектрическая проницаемость 15, 18, 39, 46, 47, 49, 52, 76, 78, 88, 118, 339.

Домены 219, 316, 317, 318.
Донорная примесь 284, 285, 286.
«Дырка» электронная 36, 285.
Дюралюминий 192.

Железо 25, 26, 37, 134, 245, 252, 254, 255, 261, 262, 263, 264, 272, 274, 275, 276, 277, 294, 317, 318, 319, 320, 325, 331, 344.
— карбонильное 325, 333, 334, 340.
— электролитическое 325.

Запорный слой 282, 299, 302, 307.
Золото 24, 36, 68, 109, 245, 248.
Зона заполненная 285, 289.
— запрещенная 284.
Зонная плавка 289.
— теория 34.

Изоперм 331.
Инвар 270.
Индий 245, 247, 270, 294.
Ионизация 56, 83, 96, 130, 131.

Кадмий 245, 247, 258, 266, 271, 272, 301, 336.
Кальций 24, 26.
Канифоль 94, 120, 156, 158, 159, 160, 273.
Капрон 87, 139, 146, 148, 175, 181, 182.
Карбид бора 283.
— кремния 283, 293, 294, 295, 298.
Картон 87, 163, 178, 180.
Катушка индуктивности 11, 110.
Каучук 87, 128, 136, 137, 156, 170, 172, 173, 174, 187, 192.
Квадратор 297.
Кварц 45, 51, 62, 63, 71, 110, 124, 131, 160, 199, 226, 227, 228, 230.
Керамика 93, 110, 112, 119, 120, 122, 190, 194, 196, 197, 214, 254, 272, 293.
— высокочастотная 14, 196.
— конденсаторная 195.
— кордиеритовая 90, 204, 207, 208.
— корундовая 198, 199, 200, 202.
— корундо-муллитовая 200, 202.
— муллитовая 198, 199, 200.
— периклазовая 204, 207, 208.
— перовскитовая 209.
— пористая 195.
— станнатная 209.
— стеатитовая 51, 204, 205, 207.
— титановая (рутиловая) 50, 51, 65, 108, 109, 209, 210.
— титано-циркониевая 206.
— установочная 195.
Керамика форстеритовая 204, 207, 208.
— цельзиановая 198, 199, 200, 203.
— шпинелевая 204, 205, 207.
Кислород 25, 26, 28, 37, 46, 96, 97, 121, 157, 165, 217, 268, 276, 277, 278, 286.
Клей 139, 156, 161, 168, 190, 192.
Кобальт 25, 37, 317, 318, 320, 331, 332, 343, 344.
Ковар 270, 271.
Компаунд 45, 85, 94, 139, 156, 159, 161, 163, 188, 190, 191.
Конденсатор 10, 11, 75, 102, 110, 178, 222, 261, 266.
Константан 254, 274, 275.
Копель 253, 254.
Корунд 45, 50, 89, 198, 199, 200.
Коэрцитивная сила 322.
Коэффициент затухания 19, 21.
Кремний 24, 186, 187, 261, 262, 283, 285, 286, 294, 302, 304, 308, 329, 331, 343, 344.
Кремнийорганические соединения 120, 139, 178, 183, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192.
Кристадин 305.

Лавсан 146, 147.
Лак 139, 152, 156, 161, 162, 180, 190, 262.
— бакелитовый 166.
— глифталевый 167.
— кремнийорганический 133, 188, 189, 191.
— масляно-битумный 164, 166, 167, 182.
— масляно-глифталевый 166.
— масляно-смоляной 164, 166.
— масляный 164, 182.
— покровный 163.
Лак полистирольный 167.
— пропиточный 163.
— эскапоновый 167.
— эфиро-целлюлозиый 164, 167.
Лакоткань 124, 182.
Латунь 251, 259.
Лед 51, 87, 88, 89.
Лента 180.
Лэтин 295.

Магнетит 333.
Магний 24, 249, 261, 262, 294.
Магнико 343, 344, 345, 346.
Магнитная проницаемость 18, 22, 319, 322, 333.
Магнитно-мягкий материал 321, 322, 325, 332.
Магнитно-твердый материал 321, 322, 342.
Магнитный сердечник 12, 333, 334, 335.

Магнитодиэлектрик 14, 22, 332, 333, 336.
Магнитострикция 318, 332.
Манганин 274.
Масло 94, 145, 158, 162, 164, 165.
— конденсаторное 84, 135, 136, 156.
— льняное 165, 166.
— тунговое 166.
Медь 14, 24, 36, 171, 245, 246, 248, 251, 252, 255, 256, 257, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 268, 272, 274, 275, 276, 286, 291, 299, 300, 329, 331, 332, 344.
Микалекс 45, 70, 71, 112, 127, 241, 242, 254.
Молекула дипольная 27.
— мономерная 28.
— нейтральная 27.
— полимерная 28.
Молибден 25, 245, 268, 269, 276, 329, 343.
Мономер 29, 136.
Морозостойкость 122.
Мрамор 71.

Наполнитель 149.
Натрий 24, 26, 248.
Никель 25, 37, 245, 248, 255, 258, 261, 270, 272, 274, 275, 276, 317, 318, 319, 320, 322, 329, 331, 332, 344.
Ниобий 24, 247, 269.
Нитролак 167.
Нитроцеллюлоза 179, 180.
Нихром 263, 274, 275, 276.
Новолок 139, 150.

Озокерит 158.
Оксидная изоляция 262.
Оксифер 337, 338, 339, 340.
Олово 24, 171, 245, 247, 248, 252, 258, 266, 283, 301, 311.
Отвердитель 161.
Очистка электрическая 59.

Парамагнетики 36.
Парафин 45, 49, 63, 70, 86, 128, 156, 158, 213.
Пенопласт 140, 155, 156.
Пермаллой 319, 320, 328, 329, 330, 332, 333.
Пермендюр 332.
Перминвар 331.
Перовскит 45.
Пирофилит 198, 199.
Плазма 100, 244.
Пластификатор 149, 161.
Пластмасса 71, 125, 136, 139, 140, 149, 161, 180, 188, 190.
Платина 25, 37, 68, 245, 252, 254, 269, 272, 276.
Платинит 270.
Платинородий 254.
Плексиглас (полиметилметакрилат) 87, 145, 146.
Пленка 139, 147, 162, 163, 180, 183, 262, 268, 273, 275, 277, 279.
Пленкокартон 180.
Плесень 119, 120.
Плотность потока энергии 16.
Поверхностный эффект 21, 264.
Поглотитель волноводный 283, 314, 315.
Подвижность 60, 244, 246, 288.
Поджигатель игнитронный 283, 311, 312.
Полиизобутилен 141, 144, 159.
Поликонденсация 137.
Полимер 29, 136.
Полимеризация 136.
Полиорганосилоксаны (см. кремний-органические соединения).
Полистирол 14, 45, 49, 70, 86, 110, 120, 121, 125, 131, 132, 136, 137, 139, 141, 144, 156, 333.
Политетрафторэтилен 86, 131, 132, 142.
Полиуретан 87, 146, 148, 160.
Полихлорвинил 125, 132, 139, 144, 145, 146, 183, 266.
Полиэтилен 14, 63, 86, 120, 125, 127, 131, 132, 135, 139, 140, 144.
Полиэтилентерефталат (см. Лавсан).
Полупроводники 14, 15, 20, 35, 250, 282.
Поляризация 39, 53, 225.
— высоковольтная 44, 64.
— дипольно-релаксационная 41, 84.
— ионная 41.
— ионно-релаксационная 42.
— резонансная 43.
— самопроизвольная (спонтанная) 44, 217, 221.
— структурная 42, 44.
— электронная 39, 40.
— электронно-релаксационная 43.
Пористость 71, 109, 117, 175, 176.
Постоянная времени 69, 292.
Потери диэлектрические 72, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 86.
— магнитные 323, 324, 333.
Почва 20, 21.
Пресспорошок 140, 149, 151, 152, 154, 190.
Припой 251, 262, 271, 272.
Пробивное напряжение 94.
Пробой диэлектриков 68, 94, 95, 105.
— тепловой 95, 106, 109.
— электрический 95, 106.
— электрохимический 109.
Проводимость несамостоятельная 56.

Проводимость самостоятельная 56.
Пропитка 119, 176.
Прочность на изгиб 114, 125.
— — разрыв 114, 125, 244, 255.
— — сжатие 114, 125.
— — удар 114, 127.
Пряжа 121, 163, 180, 181.

Радиодетали 11, 12, 13, 114, 162, 194.
Радиофарфор 64, 198, 211.
Радиоэлектроника 10, 15.
Растворимость 128.
Растворитель 162.
Резина 171, 172, 192.
Рекомбинация 56.
Решетка пространственная 31, 32, 33.
Ртуть 24, 36, 243, 245, 247, 248, 269, 311.
Рутил 45, 50.

Сажа 164, 278.
Сверхпроводники 247.
Свинец 134, 165, 245, 247, 252, 265, 266, 271, 272.
Связь ионная 28.
— ковалентная 27.
— металлическая 30.
— остаточная 30.
Сегнетова соль 45, 215, 216.
Сегнетоэлектрики 45, 74, 82, 86, 108, 193, 194, 208, 214, 222, 223.
Селен 14, 25, 283, 301, 311.
Сера 25, 26, 45, 49, 63, 70, 157, 171, 283.
Серебро 24, 26, 36, 68, 77, 109, 214, 244, 245, 248, 251, 252, 261, 268, 269, 271, 272.
Сиккатив 165.
Система единиц 3.
Скин-эффект 250.
Скипидар 158.
Слюда 14, 45, 93, 120, 131, 189, 239, 241.
— мусковит 239, 240.
— флогопит 239, 240.
Смола 136, 139, 159, 160, 162.
— анилино-формальдегидная 149.
— карбамидно-формальдегидная 149, 150.
— крезольная 150.
— кремнийорганическая 134, 156, 188.
— меламино-формальдегидная 149, 150.
— полиамидная 139, 146, 147, 148, 181.
— полихлорвиниловая 144, 156.
— феноло-формальдегидная 51, 63, 87, 128, 131, 149, 166, 183, 333.
Смола фурфурольная 149, 156.
— эпоксидная 45, 120, 160, 161.
Соль каменная 29, 30, 36, 45, 50, 62, 89.
Сопротивление 10, 11, 279, 280, 281, 295.
— волновое 17.
Спирт 28, 128, 145, 273.
Сталинит 230.
Сталь 14, 126, 252, 263, 264, 265, 272, 325, 345.
— для постоянных магнитов 343.
— электротехническая 14, 163, 263, 326, 328, 329, 332.
Старение 66, 107, 121, 129, 301, 334.
Стеатит 50, 68, 124, 125, 126, 198.
Стекло 33, 45, 50, 51, 63, 70, 71, 90, 91, 92, 107, 119, 120, 122, 125, 126, 127, 194, 199, 203, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 254, 258, 293, 333.
Стеклокерамика 239.
Стеклолакоткань 183, 189.
Стеклотекстолит 184, 191, 192.
Стеклоткань 238.
Стеклоэмаль 237.
Стеклянное волокно 238.
Стирол 136, 137, 144, 160, 180.
Сурьма 25, 36, 266, 283, 294, 311.

Таллий 25, 247.
Тальк 159, 160.
Тангенс угла потерь 18, 75, 324.
Тантал 24, 245, 247, 269.
Твердость 127.
Текстолит 120, 150, 164, 184, 185, 193.
Текстура магнитная 317, 327.
Теллур 25, 266, 283.
Температурный коэффициент 41, 49, 292, 320.
Теплопроводность 113, 124, 244.
Теплостойкость 120.
Термопара 253, 269, 310.
Термопластичные материалы 138.
Термореактивные материалы 138.
Термосопротивления 282, 291, 292, 293.
Термоэлектродвижущая сила 253, 275.
Тефлон 143.
Тиконд 108.
Тирит 295.
Титан 261.
Титанат бария 45, 216, 220.
— кальция 50.
Тиурам 171.
Ткань 163, 180, 182, 184.
Ток абсорбции 53.
— насыщения 57.
— проводимости 53.
Точка Кюри 215, 216, 218, 219, 221, 222, 316, 320, 332.

Транзистор 305.
Триацетат целлюлозы 180.
Трубка линоксиновая 183.
Тубанда метод 68.

Углеводород 128, 136, 158, 164, 165.
Углекислота 28, 46, 96, 103, 134, 278.
Углерод 25, 74, 135, 142, 186, 187, 263, 278, 279, 283, 294.
Удельная объемная электропроводность 55, 60, 244.
— поверхностная электропроводность 55, 69.
Удельное объемное электросопротивление 55, 118, 119, 131, 244, 249, 282.
— поверхностное электросопротивление 55.
Удлинение относительное 244, 255.
Ультрафарфор 89, 92, 108, 125, 198, 199, 202, 203.

Фарфор 45, 50, 63, 64, 68, 90, 92, 107, 124, 194, 199, 294.
Фенол 34, 148, 149.
Феноласт 14, 71, 76, 154.
Ферриты 14, 22, 332, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341.
Ферроксдюр 345, 346.
Ферроксдуб 337.
Ферромагнетики 22, 37, 316.
Фехраль 274, 277.
Флюсы 271, 273.
Формальдегид 149.
Фосфор 25, 283.
Фотосопротивление 282, 307, 308, 309, 310.
Фотоэлемент 283, 307, 308, 309.
Фреон 103.
Фторопласт 120, 126, 143, 144, 146, 148.

Хлор 25, 26, 27, 28.
Холла эффект 286, 287, 288, 313, 314.
Хром 25, 255, 274, 276, 277, 329, 343.
Хромаль 274, 277.
Хромель 253, 254.
Хрупкость 126.

Целлофан 180.
Целлулоид 71.
Целлюлоза 45, 51, 87, 94, 120, 136, 137, 175, 176, 177, 189.
Церезин 70, 136, 156, 158, 160.
Цинк 24, 36, 245, 247, 248, 249, 252, 258, 261, 264, 270, 272, 311, 336.

Шелк 121, 136, 175, 180, 181, 182.

Эбонит 63, 87, 121, 171, 172.
Элегаз 103.
Электреты 193, 194, 214, 228, 229.
Электрическая прочность 94.
Электролитический конденсатор 260, 261, 262.
Электропроводность 15, 54, 58, 59, 66, 78, 84, 282, 284, 285, 286, 288, 289, 290.
— примесная 62, 285.
— собственная 62, 285.
Эмаль 163, 180.
Энергетический уровень 34.
Эрозия 268.
Эскапон 173.
Этилен 46, 135.
Эфиры целлюлозы 87, 139, 159, 179, 181.

Янтарь 70.

Цена 95 коп.